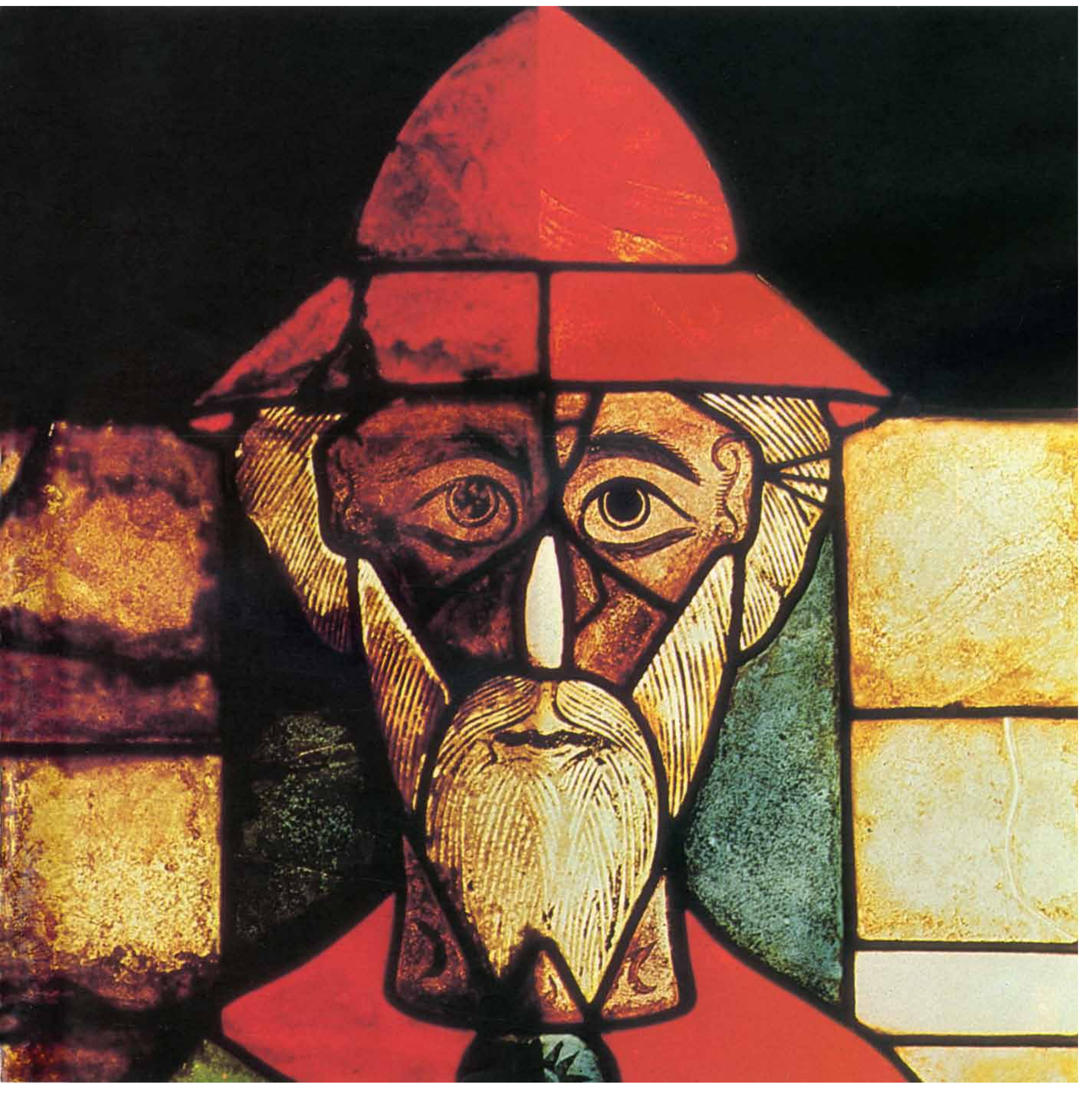
INVESTIGACION Y CIENCIA

Edición en español de **SCIENTIFIC AMERICAN**



LAS VIDRIERAS MEDIEVALES EN PELIGRO

Julio 1985
400 PTAS.

Los espacios en gris
corresponden a publicidad
en la edición impresa

Número 106
Julio 1985



EDITA: Prensa Científica, S. A.
Calabria, 235-239
08029 Barcelona (ESPAÑA)

Colaboradores de este número:

Asesoramiento y traducción:

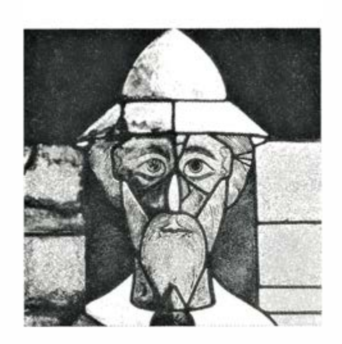
Isabel García Acha y Julio Rodríguez Villanueva: *Biología molecular de las vacunas de la malaria*; Manuel Puigcerver: *Así explota una supernova*; Bernabé Sanz: *El queso*; Joandomènec Ros: *La muda del cangrejo azul*; Juan Pedro Adrados: *Cristales a altas presiones*; Natividad Sánchez Sáinz-Trápaga: *Percepción de un entorno estable*; Alfredo J. Morales: *Restauración de vidrieras medievales*; Luis Bou: *Juegos de ordenador*; J. Vilardell: *Taller y laboratorio.*

Ciencia y sociedad:

Bernabé Sanz Pérez y Juan Modolell

Libros:

Luis Bru, José F. Prida, Carlos López-Fanjul y Jaime Muñoz Masqué



LA PORTADA

La fotografía de cubierta ilustra la fase intermedia en la lucha por la restauración de algunas de las más antiguas vidrieras del mundo (véase *Restauración de vidrieras medievales*, por Gottfried Frenzel, en este mismo número). El panel, realizado en torno al año 1130, representa al profeta Oseas. Con otras cuatro imágenes de profetas, formó parte de las vidrieras correspondientes al clerestorio meridional de la catedral de Augsburg. En el sector derecho del panel se ha eliminado la corrosión, mientras que la zona izquierda permanece oscurecida. Dos piezas del mismo panel, la nariz y una parte del fondo correspondiente a la zona inferior derecha, pertenecen a sustituciones de los vidrios originales, efectuadas en el siglo XIX. Ofrecerían entonces la misma transparencia que los originales. Y así indican el grave daño ocasionado entonces por la polución atmosférica del siglo XX, especialmente por el dióxido de azufre.

Suscripciones:
Prensa Científica, S. A.
Calabria, 235-239
08029 Barcelona (España)
Teléfono 322 05 51 ext. 33-37

Condiciones de suscripción:
España:
Un año (12 números): 4400 pesetas
Extranjero:
Un año (12 números): 33 U.S. $
Ejemplar atrasado ordinario:
400 pesetas
Ejemplar atrasado extraordinario:
500 pesetas

Distribución para España:
Distribuciones de Enlace, S. A.
Bruch, 49 - 08009 Barcelona

Distribución para los restantes países:
Editorial Labor, S. A.
Calabria, 235-239 - 08029 Barcelona

Publicidad:
Madrid:
Gustavo Martínez Ovin
Avda. de Moratalaz, 137 - 28030 Madrid
Teléfonos 430 84 81 - 437 12 91
Cataluña:
Lourdes Padrós
Manuel Girona, 61, 2.º - 08034 Barcelona
Teléfono 204 45 83

Controlado
por O.J.D.



PROCEDENCIA DE LAS ILUSTRACIONES

Pintura de la portada de Gottfried Frenzel

Página	Fuente
6	Ricardo Génova y Domingo Campillo
7	Ricardo Génova, tomado de Le Gros Clark (*arriba*); Ricardo Génova, tomado de J. Dudley (*abajo*)
8	Cortesía de E. Vives. Fotografía, Oriol Clavell (*arriba*); Domingo Campillo (*abajo*)
9-10	Domingo Campillo
11	Cortesía de E. Vives. Fotografía, Oriol Clavell
12	D. Campillo
13	Cortesía de E. Vives. Fotografía, Oriol Clavell
15-16	Patricia J. Wynne
17	G. Nigel Godson, Facultad de Medicina, Universidad de Nueva York
18-19	Patricia J. Wynne
20	Edward Bell
21-22	Patricia J. Wynne
25-33	Ian Worpole
34-35	Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación
41	Roquefort Association, Inc.
42-44	James Kilkelly
45	Roger Maret, Nestlé, S.A. (*arriba*); Quesada/Burke (*abajo*)
46-47	Quesada/Burke
50	James N. Cameron, Universidad de Texas en Austin
52-56	Tom Prentiss
58-65	Allen Beechel
68-69	Quesada/Burke
70-74	Carol Donner
77	Sonia Halliday Photographs (*izquierda*); Westfälisches Amt für Denkmalpflege (*derecha*)
78-80	Gottfried Frenzel
81	Sally Black
82	Gottfried Frenzel
84-87	Ilil Arbel
88-89	James K. Park
90-96	Michael Goodman

ISSN 0210-136X
Dep. legal: B. 38.999-76
Fotocomposición Tecfa
Pedro IV, 160 - 08005 Barcelona
Fotocromos reproducidos por GINSA, S.A.
Imprime GRAFESA
Gráfica Elzeviriana, S.A.
Nápoles, 249 - Tel. 207 40 11
08013 Barcelona
Printed in Spain - Impreso en España

Hace...

José M.ª López Piñero

... cuatrocientos años

Francisco Martínez de Castrillo, autor de los primeros tratados de odontología impresos en Europa, murió en la localidad madrileña de Alameda del Valle.

A las obras de Martínez de Castrillo dedican amplio espacio los estudios históricos generales de la odontología, pero su biografía era prácticamente desconocida hasta la tesis doctoral que F. G. Carmona Arroyo presentó en 1972. Gracias a ella sabemos, entre otras cosas, que nació en el pueblo palentino de Castrillo de Onielo hacia 1520 y que fue dentista de cámara de Felipe II durante dos décadas, desde 1565 hasta su muerte. El nombramiento, que lo equiparaba a los médicos y cirujanos regios, se hizo expresamente por su "habilidad y experiencia en curar de boca y dentadura", cuando ya había obtenido el título de licenciado. El monarca dio numerosas muestras de aprecio hacia su dentista quien, durante sus dos últimos años, "en razón de su edad y poca salud", permaneció ausente de la Corte, "librándosele enteramente su salario". Martínez de Castrillo, en suma, debe ser considerado como la figura inicial, tanto de la profesión, como de la literatura odontológica.

Su primer libro fue el titulado *Coloquio breve y compendioso sobre la materia de la dentadura y maravillosa obra de la boca* (1557). Utiliza el diálogo como forma literaria, igual que tantos otros textos científicos de la época, y ofrece un estudio sistemático de la patología y la clínica de las afecciones dentarias, su terapéutica medicamentosa y operatoria y su prevención. El libro refleja la experiencia personal de su autor, pero su característica principal es la integración de las cuestiones odontológicas en el saber médico general propio del mundo académico de la época. Parte de la anatomofisiología del galenismo tradicional y se basa después en sus esquemas patológicos y terapéuticos.

El *Tratado breve y compendioso sobre la maravillosa obra de la boca y dentadura* (1570), segundo libro de Martínez de Castrillo, es una obra de madurez. Responde a una experiencia clínica y terapéutica más rica y a un fundamento doctrinal más amplio y matizado. Por otra parte, la forma dialogada de la primera obra es sustituida por una exposición directa, estructurada de modo semejante a los grandes tratados quirúrgicos de la centuria. Este texto tuvo una gran influencia en España durante casi un siglo, siendo copiado parcialmente o resumido por médicos, cirujanos e incluso por autores ajenos a la medicina. En toda Europa, no volvió a publicarse un tratado de significado semejante para el desarrollo de la odontología hasta la aparición del *Chirurgien-Dentiste* (1723), de Pierre Fauchard.

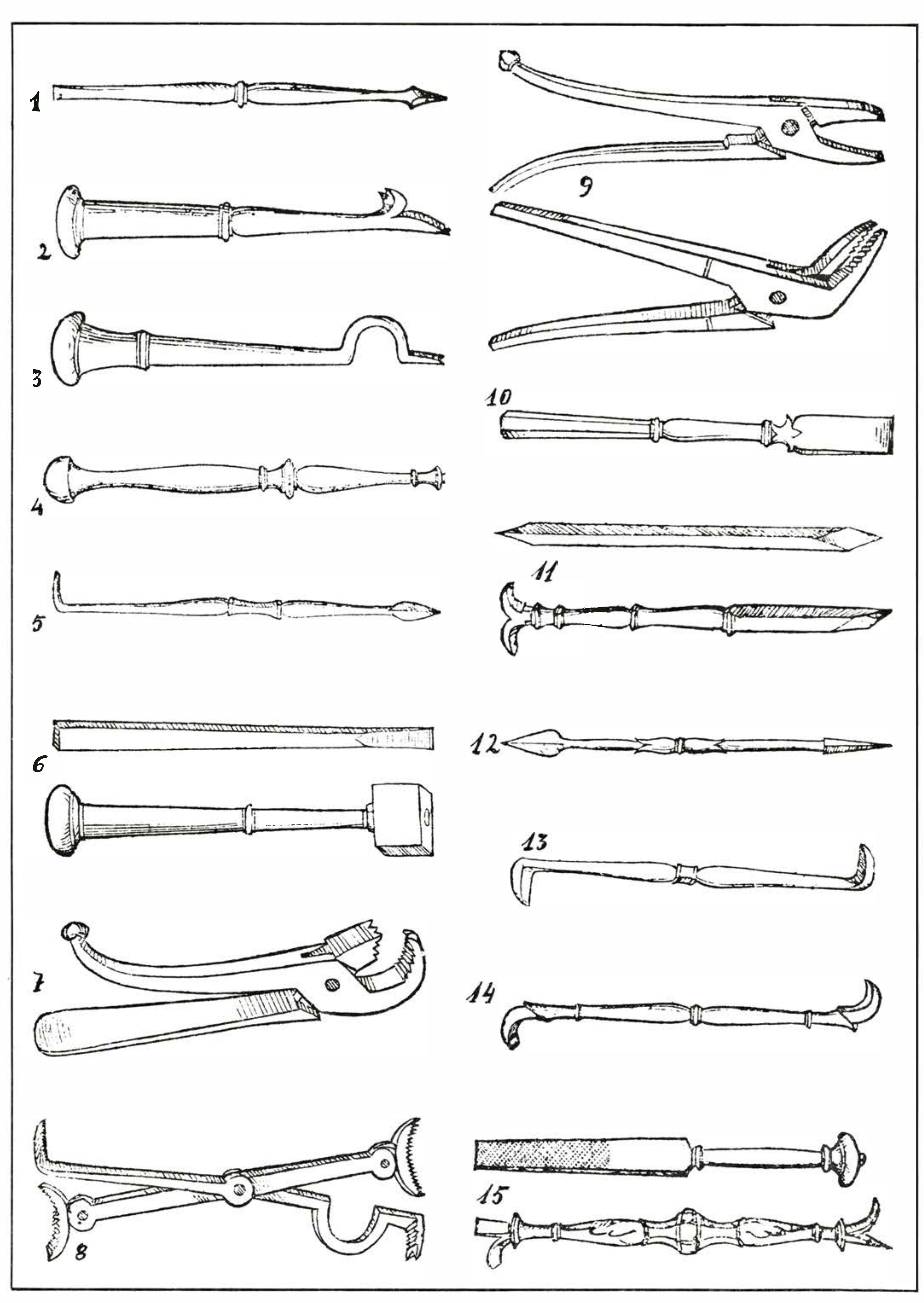
Un aspecto de las obras de Martínez de Castrillo que tiene particular interés es el relativo al instrumental odontológico:

"Si se corrompen los dentecillos [= dientes de leche], en el punto que se les hagan unas manchicitas, hay que mirar de quitallas con una herramienta muy afilada, que tenga a la una parte una punta como lanzuela y a la otra llanita como escoplito, como aquí va [fig. 1]. Hase de usar de cada parte deste hierro como fuere menester según que fuere lo corrompido. Y después, con un palillo mojado en un poco de vino cocido con un poco de alumbre y sal común, darle en aquellas manchitas donde se quitó lo podrido, y si esto se hace con tiento se remediará fácilmente. En las muelas es más dificultoso el remedio, pero menos el peligro...

"Acontesce nascer un diente y quedarse el viejo también y, como el uno de ellos se ha de sacar por fuerza, por superfluo o ser feo, en tal caso los que vienen a sacar algún diente de aquellos no miran más que al buen parescer y así sacan el más tuerto. Esto es muy gran error, porque si aciertan a sacar el nuevo y dejar el viejo, quedarán muy presto sin el uno y sin el otro, porque aquel tal que dejan no tiene raíces y así cae y peresce muy presto... Y todo esto se excusaría con tener en cuenta en sacallos con tiempo antes que salga el nuevo torcido. Estos dentecillos se han de sacar con un botador como éste [fig. 2]. Si el diente está de parte de fuera con la vuelta del hierro, y si de parte de dentro, con la punta derecha. Pero si acontesciere salir algún diente muy dentro de la boca de parte de dentro, hanle de sacar con un botador como éste y con esta vuelta [fig. 3], porque si la mano se desmandare con la vuelta, se detenga, afirmando en los dientes, y no lastime en la garganta o en otra parte alguna de la boca...

"Qué muela se ha de sacar, estando en duda cuál duele, porque acontesce muchas veces sacar la buena y dejar la mala y que hace el dolor. Lo primero que se ha de mirar si hay alguna dañada o no; si no está dañada ninguna, han de tomar un hierro que tenga una cabecita como éste que está aquí pintado [fig. 4], y dar en las muelas de que se tiene sospecha, y en la que más se sintiere el dolor está el mal y se ha de sacar; y si hay alguna corrompida, mirar si es sola una o más; si no hay más de una, manifiesto es que está allí el daño y que aquella se debe sacar; si están dañadas más que una, han de tomar un hierro que tenga una punta a manera de lancilla como aquí va pintado [fig. 5], y de la otra parte, una vuelta como garabatillo para las muelas que se comen por detrás; y con él escarbar en lo podrido, y después de quitado lo malo en la que doliere mucho llegando el hierro está el daño y causa del dolor, y es la que se ha de sacar. Esto está claro, porque si aquella siente el hierro más que las otras es porque está más comida y más descubierto el nervecillo... Y porque muchas veces acontesce estar el daño entre muela y muela, que no se puede ver, en tal caso han de hacer la prueba del hierro que tiene la cabecita, dando en cada una de las muelas de que se tiene sospecha y lo demás como tengo dicho. También se puede apartar la una de la otra y hacer la experiencia del hierro de la punta. Pero todo esto quiere gran cuidado, subtileza y experiencia. Háse de apartar la muela con un hierro a manera de escoplito muy afilado y con un martillito [fig. 6], porque se hace más fácil y delicadamente y más sin pesadumbre que con lima, aunque podría acontescer alguna vez que hubiese necesidad de limar algo para que se cortase mejor...

"Que sepan cuando se ha de sacar la muela con gatillo y cuando con policán, porque acontesce muchas veces quebrar la muela por no saber. Cuando la muela no está corrompida, o está poco comida que pueda sufrir alguna fuerza sin quebrarse, háse de sacar con gatillo [fig. 7], porque se saca más fácil y pres-



Instrumental odontológico recomendado por Francisco Martínez de Castrillo

to, y sin pesadumbre de la otra dentadura que queda. Pero si de la muela se tiene alguna sospecha que se ha de quebrar, háse de sacar con policán [fig. 8], porque si le sabe bien exercitar, aseguran la muela, aunque esté más podrida que no se descabece. Cuando hay algún pedazo de muela o raigón que se ande, hánse de quitar con una destas dos herramientas [fig. 9], que tengan por la parte que asen unas rayitas menudas y hondillas como éstas. Cuando en las muelas postreras acontesciere tener algunas puntillas que den pesadumbre o gasten sus opuestas, hánse de cortar con un hierro como éste [fig. 10], muy afilado y con el martillico...

"Para quitar la toba [= sarro], estas herramientas son más a propósito: un borne de la forma de uno destos [fig. 11], una lancilla con una punta con tres esquinillas, de la otra como un corazón llanita [fig. 12]. Estas son para la parte de fuera. Para la parte de dentro ha de haber un hierro con dos puntas vueltas a manera de descarnador de barbero, salvo que han de ser cortillas [fig. 13]. Con este hierro han de sajar y cortar delicadamente la toba, porque acontesce por sacarla entera salir con ella el diente. Después de sajada háse de acabar de quitar con un hierro que tenga otras dos puntas vueltas, la una a manera de pico de perdiz y la otra anchuela [fig. 14].

"Tener hecho un mondadientes de plata en casa, algo grande, de la forma que aquí os pintaré; y todas las veces que el barbero viniere para haceros la barba, mandarle que con aquel mondadientes os limpie la dentadura y lo mismo a todos los que criaren toba, y con esto excusarán de no llegar hierro y conservarse ha la dentadura limpia y las encías sanas, y muchas otras buenas obras provechosas para la salud de la boca y conservación de la dentadura; esto tengo yo muy bien experimentado en personas que tienen este cuidado, de mes a mes, o de dos a dos meses, porque en este tiempo no se puede formar tan recia la toba que no baste plata para quitarla, pero si la deja más, enduresce y no se puede excusar hierro... Este mondadientes que digo [fig. 15] tiene cuatro piezas que son necesarias y suficientes para conservar limpia la dentadura. Dos anchuelas a manera de escoplillos y dos puntiagudas. De las dos anchuelas, la que está derecha es para la raíz de los dientes de parte de fuera; la que está vuelta, para lo mismo de parte de dentro. De las dos puntiagudas, la que está derecha es para entre diente y diente de parte de fuera, y la que está vuelta para lo mismo de parte de dentro..."

Paleopatología de la columna vertebral

El hueso es la parte del organismo que más resiste al paso del tiempo después de la muerte. La paleopatología de la columna refleja dos tipos de afecciones, uno común al esqueleto y otro en relación directa con la adquisición de la bipedia

Domingo Campillo

La paleopatología estudia las enfermedades de los organismos que vivieron en la antigüedad. Sin fecha fija de arranque, hay acuerdo en situar su fin en las postrimerías de la Edad Media. En ese dilatadísimo intervalo caben los más diversos organismos, algunos de los cuales han sufrido un proceso de fosilización. Sólo los vertebrados poseen una columna característica, que sirve de sostén al esqueleto. En el grupo de los vertebrados se encuadran los mamíferos, clase que acoge al suborden de los antropoides, al que pertence el género *Homo*, que es el de nuestra especie: *Homo sapiens*. Limitaremos nuestra exposición a la paleopatología de la columna vertebral de los homínidos.

La columna vertebral constituye el eje del tronco y sirve de soporte a la cabeza y, de forma indirecta, a través de las cinturas escapular y pelviana, a las cuatro extremidades. En los animales con cola, este apéndice es la prolongación del coxis. Tiene la columna una función de protección; está en íntima relación con la médula espinal y los nervios raquídeos, lo que da una idea inmediata de la importancia que los procesos patológicos que la afecten tendrán para el individuo.

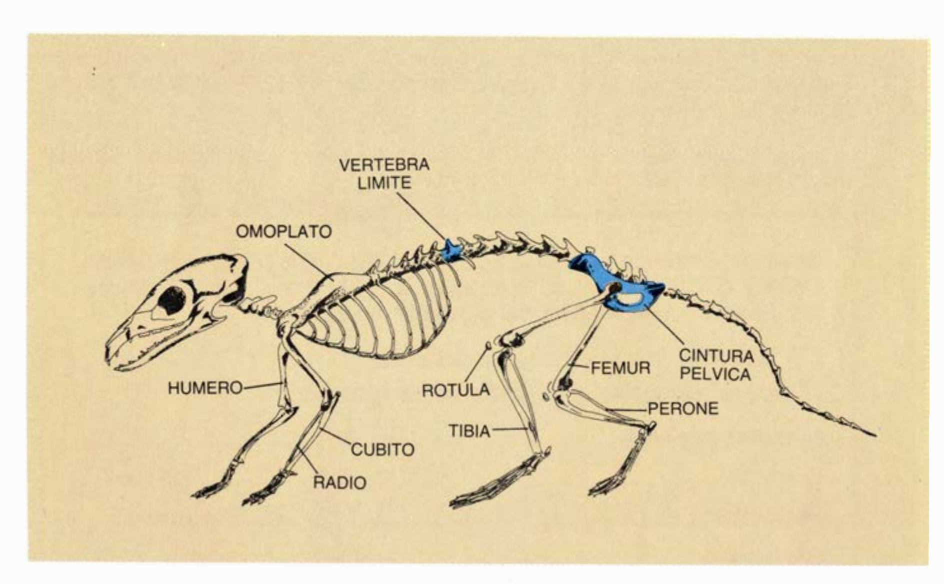
La morfología de la columna varía en las distintas especies y sus características dependen de la estructura del grupo. Influye, sobre todo, en la forma de deambulación que, en los mamíferos, adopta tres variedades: tetrapodia, braquiación y bipedia. Dominan las formas cuadrúpedas, hasta el punto de que las primeras clasificaciones intuitivas que se crearon las consideraron grupo propio. Entre los primates predomina la braquiación. Sólo los homínidos son bípedos.

Durante el período embrionario aparece el surco neural, formado por el ectodermo invaginado, delante del cual se encuentra la cuerda dorsal. En fases posteriores, el surco neural se transforma en tubo neural; a la cuerda dorsal, que por abajo sobrepasa el coxis y por arriba se prolonga hasta el cráneo, se le adosan unas estructuras mesenquimatosas. Dichas formaciones emiten prolongaciones que se juntan en la cara dorsal y constituyen un anillo de protección alrededor del tubo neural, dando así origen a las vértebras. La cuerda dorsal regresa hasta los cuerpos vertebrales y sólo persiste entre los mismos, constituyendo los discos invertebrales.

En cada vértebra hay que considerar dos porciones: el cuerpo y el arco posterior. En el arco se desarrollan en una fase avanzada del mismo las apófisis. La persistencia de los discos intervertebrales facilita la presencia de curvaturas fisiológicas y la conservación de una amplia capacidad de movimientos.

Las curvaturas de la columna vertebral son muy ostensibles en el hombre cuando se le mira de lado; en sentido anterior, por contra, es rectilínea, aunque existe una ligera escoliosis o desviación de concavidad, en general izquierda, a nivel del tórax. Parece deberse esa desviación a la mayor potencia de la musculatura de la extremidad superior derecha. (En los zurdos ocurre al revés.) Vista de lado, la columna muestra cuatro curvaturas: una cervical de concavidad posterior (lordosis), otra dorsal o torácica de concavidad anterior (cifosis), una tercera lordosis lumbar y una cuarta curvatura (cifosis sacrocoxígea). En su conjunto, estas curvaturas confieren a la columna un aspecto de "S" itálica.

En los mamíferos tetrápodos sólo hallamos dos curvaturas, una tóracico-lumbar, que es la fundamental, con la concavidad ventral, y otra cervical, variable, según la posición más o menos



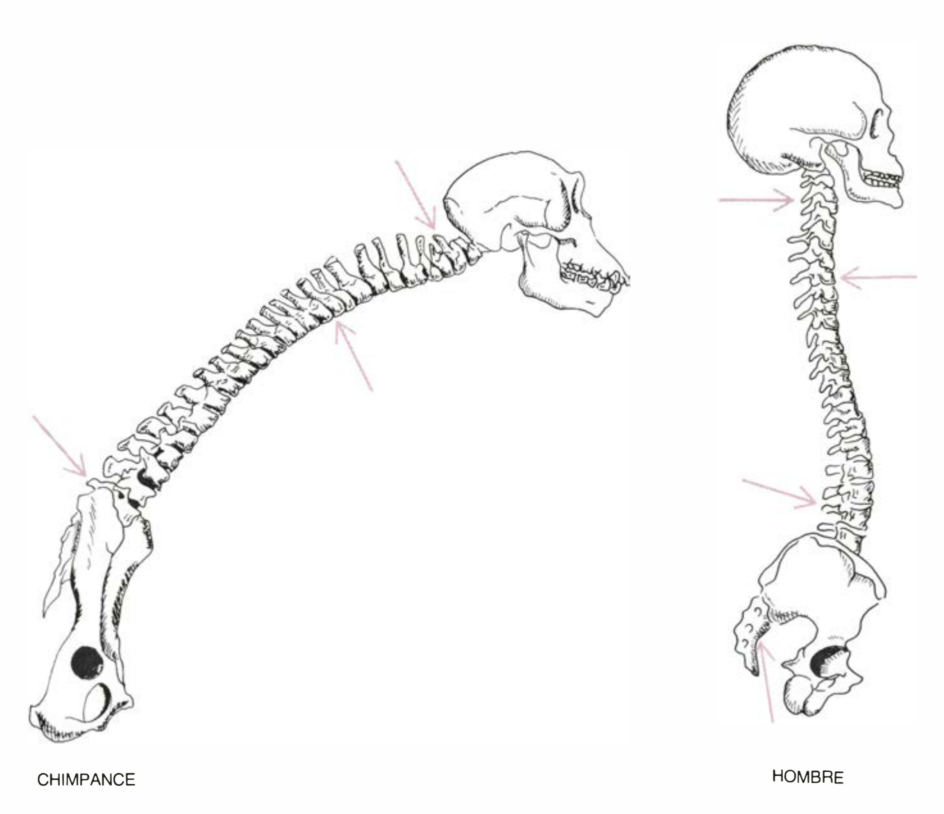
1. COLUMNA VERTEBRAL de un animal tetrápodo. La columna, que constituye el eje del tronco y sirve de soporte a la cabeza y las extremidades, actúa como un resorte variando su curvatura.

elevada de la cabeza. Desde los trabajos de Paul Broca se sabe que la curvatura torácico-lumbar se comporta, durante la marcha, como un compás de dos ramas, en el que una se relaciona con las extremidades anteriores y la otra con las posteriores. Cuando el animal anda, las ramas del compás se mueven, abriéndose o cerrándose a partir de un punto o charnela; éste se corresponde con una vértebra llamada límite, o diafragmática, por coincidir con la separación entre tórax y abdomen. Suele ser la décima vértebra dorsal. Gracias a la motilidad de las ramas de este compás vertebral, la columna actúa como un resorte o muelle que amortigua los movimientos de la marcha.

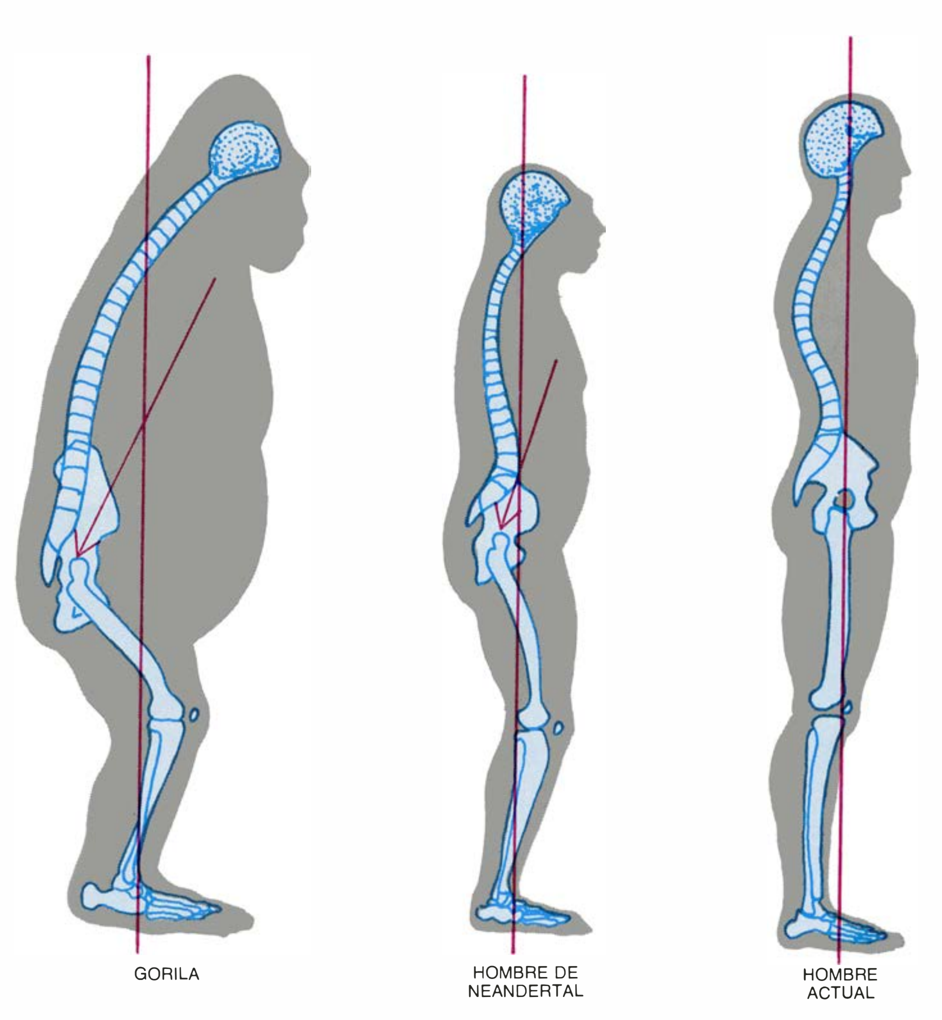
Esta disposición de la columna se da también en los primates inferiores, prosimios y simios, a pesar de que en estos últimos la posición de reposo es sentada. La marcha suele ser, empero, tetrápoda o por braquiación. Los antropoides desarrollan una marcha distinta, que determina que la columna presente cambios morfológicos intermedios entre los tetrápodos y el hombre. Los cambios anatómicos consisten en la aparición de un esbozo de curvatura lumbar, así como una pequeña angulación del sacro con relación al raquis. Estas modificaciones no son constantes, y entre los póngidos sólo se constatan en el chimpancé. Sí son constantes en los hylobátidos, sobre todo en el Siamang, que posee ya un ángulo lumbosacro (promontorio). Todos estos primates son braquiadores, semibípedos y, en ocasiones, adoptan la estación erecta.

Sólo en el hombre se encuentran las cuatro curvaturas plenamente desarrolladas, siendo también el único animal que deambula erecto y en el que las extremidades anteriores (las superiores) no participan en la locomoción. La adquisición de la bipedia tuvo lugar hace más de tres millones y medio de años, pues esa es la edad atribuida al homínido más antiguo conocido: *Australopithecus afarensis*. Las curvaturas humanas parecen destinadas a conferir una mayor solidez a la columna vertebral; gracias a su elasticidad aumenta también la estabilidad del cuerpo. Se aprecian algunas variaciones propias del dimorfismo sexual, siendo quizá la más destacada la mayor curvatura de la ensilladura lumbar en la mujer.

Por último, conviene saber que, si bien la bipedia es característica del hombre, no es habitual en él la actitud erecta; para su reposo, se sienta o se tumba, pues la permanencia en pie, sin



2. COMPARACION entre la columna vertebral del hombre, con sus cuatro curvaturas, y la del chimpancé, que como los restantes póngidos posee solamente tres. (Las flechas señalan sus concavidades.)



3. POSICIONES ERGUIDAS: la del gorila, el hombre de La Chapelle-aux-Saints (neandertalense) y el hombre actual. Que la posición del hombre de La Chapelle-aux-Saints sea la aquí representada no es aceptado por todos los paleoantropólogos modernos. (Esquema recreado a partir de otro de J. Dudley.)



4. HUELLAS TIPICAS DE NODULOS DE SCHMORL en las caras superiores de dos vértebras lumbares, en un individuo de época romana, procedente del Mas d'En Rofes. (Cortesía de E. Vives.)

deambular, le resulta fatigosa. La actitud erecta plantea, además, una patología que, en gran parte, es exclusiva del hombre. En esa "patología erecta" se incluyen las hernias inguinales, las discales, ptosis diversas y otras.

Las hernias discales son lesiones vertebrales cuya causa reside en la posición erecta. Las hay de dos variedades: el prolapso dentro del canal raquídeo y la hernia intraesponjosa o nódulo de Schmorl. Aunque puede presentarse en cualquier disco intervertebral, el prolapso discal predomina en los puntos sometidos a una mayor sobrecarga, que suele coincidir también con los de máxima motilidad. La columna lumbar es el sector que soporta más peso y sufre más microtraumatismos; predominan en ella las hernias discales que, en un noventa por ciento de los casos, se originan en los dos últimos discos de este sector, con ligero predominio del cuarto sobre el quinto. El tercer lugar lo ocupa la porción inferior de la columna cervical, en donde los dos últimos discos contabilizan el cuatro por ciento de las hernias discales.

Para comprender la hernia discal hay que tener en cuenta las condiciones anatómicas. La pilastra que en su conjunto es la columna vertebral queda constituida por los cuerpos vertebrales y los discos que se intercalan entre cada dos vértebras. El disco viene a ser un estuche fibroso, en cuyo interior hay una sustancia más elástica que se conoce como núcleo pulposo; ésta permite la deformación del disco ante los aumentos de presión. Merced a tal elasticidad, las curvaturas de la columna aumentan o disminuyen y se faculta su lateralización y los movimientos de torsión. Por causas diversas, se altera la resistencia del anillo fibroso; si la presión ejercida rebasa cierto umbral, se fractura, al principio parcialmente y al final en su totalidad. Suele romperse entonces el borde posterior, más delgado y sometido a mayor presión. A través de la grieta que se abre en el disco, el núcleo pulposo sale y penetra en el interior del tubo raquídeo, ocupado por la médula espinal o las raíces de la "cola de caballo"; cuando la rotura del disco es total, llega a hacer extrusión en el interior del tubo para constituir la típica hernia discal.

El tubo raquídeo es de calibre reducido. En su interior, el núcleo pulposo constituye un cuerpo extraño, bastante duro, que comprime las estructuras intrarraquídeas, médula o raíces, dando lugar a distintos cuadros neurológicos, en los que, en general, predomina el dolor y la paresia (disminución de fuerza).

Los nódulos de Schmorl, que según su descubridor estarían presentes hasta en el 38 por ciento de los individuos, con mayor frecuencia en los hombres, tienen, según los radiólogos, una incidencia muy inferior (13,5 por ciento). Los nódulos de Schmorl son hernias intracorporales. Aquí no se rompe, pues, el anillo fibroso del disco, sino su cara superior, la inferior o ambas a un tiempo; a su través, extruye el núcleo pulposo, que hunde la capa de hueso compacto de la cara superior o inferior del cuerpo vertebral y penetra en el tejido esponjoso. Un proceso cicatricial posterior vuelve a recubrir de hueso compacto al tejido esponjoso, aislando al núcleo pulposo. En paleopatología, no es fácil detectar los prolapsos, mientras que demostrar la presencia de los nódulos de Schmorl es mucho más factible.

Los únicos casos diagnosticados como prolapsos discales que hemos podido encontrar son los presentados por Mafart, procedentes de la ermita de La Gayole, en la región de Provenza. El prolapso sólo suele afectar a tejidos no óseos, que se destruyen de forma precoz a causa de la putrefacción. En teoría, solamente en las momias sería posible descubrir estas lesiones, pero otro tipo de dificultades hacen que hasta ahora no se haya descrito ningún caso. De forma bastante excepcional, algún núcleo discal extrusionado puede dejar

5. VERTEBRAS CERVICALES sexta y séptima, fusionadas en su lado izquierdo. Presenta, además, costillas cervicales izquierdas (CC) de implantación ectópica y espina bífida (EB). Período talayótico.

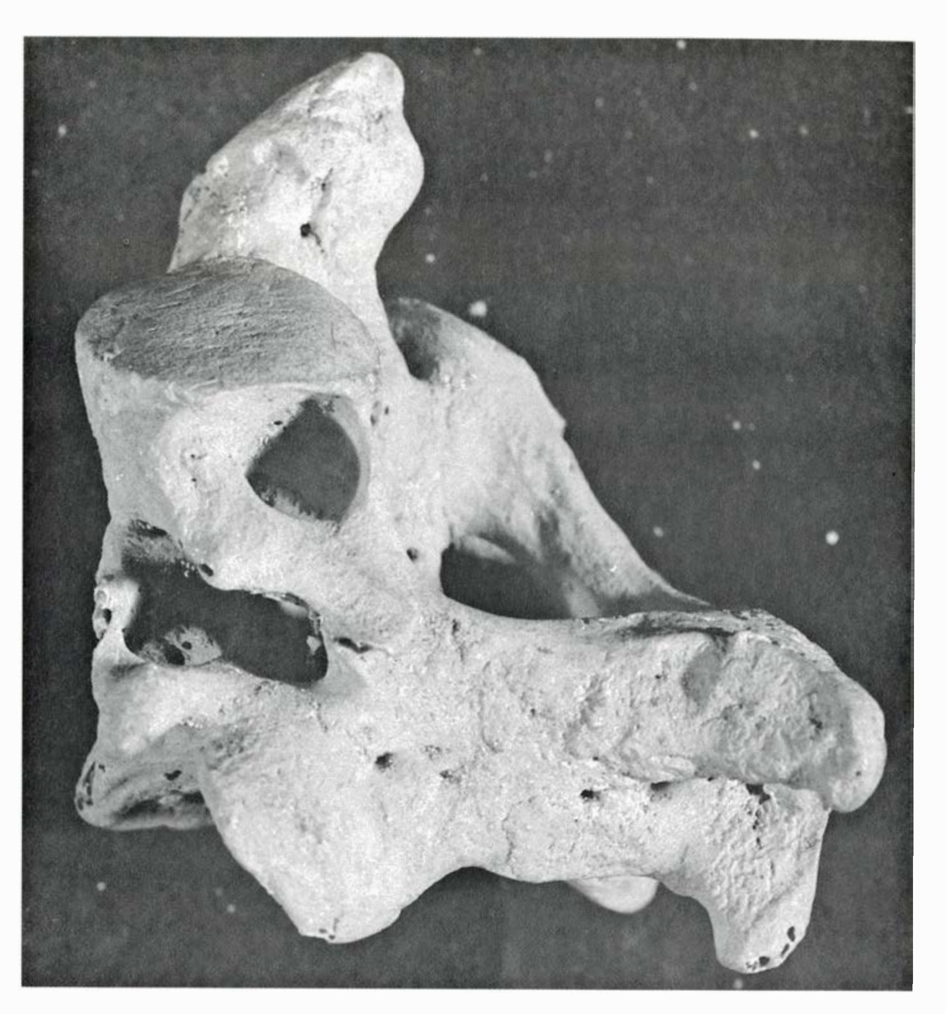
su huella en el hueso, sobre todo si se trata de una hernia antigua en la que se sigue un proceso de fibrosis. Estas circunstancias son las que probablemente han permitido a Mafart encontrar sus muestras.

El diagnóstico de las hernias intraesponjosas es mucho más fácil. Dejan su huella típica en las caras de los cuerpos vertebrales, casi siempre en la columna lumbar.

Otra patología bastante común es la espondilolistesis. Consiste en el desplazamiento de una vértebra sobre otra, con pérdida en la alineación de los cuerpos. Toma distintas denominaciones según hacia dónde se produzca la luxación: anterolistesis (hacia adelante), retrolistesis (hacia atrás) y laterolistesis (hacia un lado). Para explicar el desplazamiento de los cuerpos vertebrales se han esbozado varias teorías. Todas asignan cierta influencia al ortostatismo. En algunos casos, hay fractura del arco vertebral, pero en otros la vertebra está íntegra y se trata de un problema de los ligamentos intervertebrales. El proceso patológico de la espondilolistesis debería poderse diagnosticar fácilmente, pero la alineación de la columna suele perderse con carácter póstumo, lo que imposibilita el diagnóstico. Que sepamos nadie ha hablado de ningún caso.

Las calcificaciones discales constituyen una alteración, descrita por Luschka en 1858, cuya etiología y clínica sigue siendo oscura; mucho más frecuente en las personas de edad, aunque también se encuentra en los individuos jóvenes e incluso en los niños. Gray observa que, de sesenta y cuatro momias egipcias, de antigüedad y procedencia conocida, en dieciocho de ellas, de todas las edades, hay calcificación discal. Algunos autores han sugerido que ello se deberá al uso del natrón en la práctica del embalsamamiento, pero no se ha podido demostrar. Se desconoce por qué esta afección era relativamente frecuente en el antiguo Egipto.

La columna vertebral tiene diversas curvaturas fisiológicas (cifosis, lordosis y escoliosis) que, cuando sobrepasan ciertos límites, entran en el terreno de la patología, sobre todo en lo que hace referencia a las escoliosis. La región más afectada suele ser la columna dorsal y la afección más común la cifoescoliosis idiopática juvenil, en que los cuerpos vertebrales adoptan una morfología cuneiforme (en cuña), que es la responsable de las curvaturas de la columna. Las cifoescoliosis secundarias a otros procesos son algo más frecuentes.



6. BLOQUE VERTEBRAL, que incluye a la segunda y tercera vértebras cervicales. La primera vértebra cervical se había sinostosado con el occipital (asimilación del atlas). Este individuo tenía una malformación craneal, impresión basilar con platibasia. Pertenece a la necrópolis talayótica de Son Real, Alcudia.

El autor ha constatado algunos casos. Steinbock ha publicado uno muy espectacular debido a una osteomalacia.

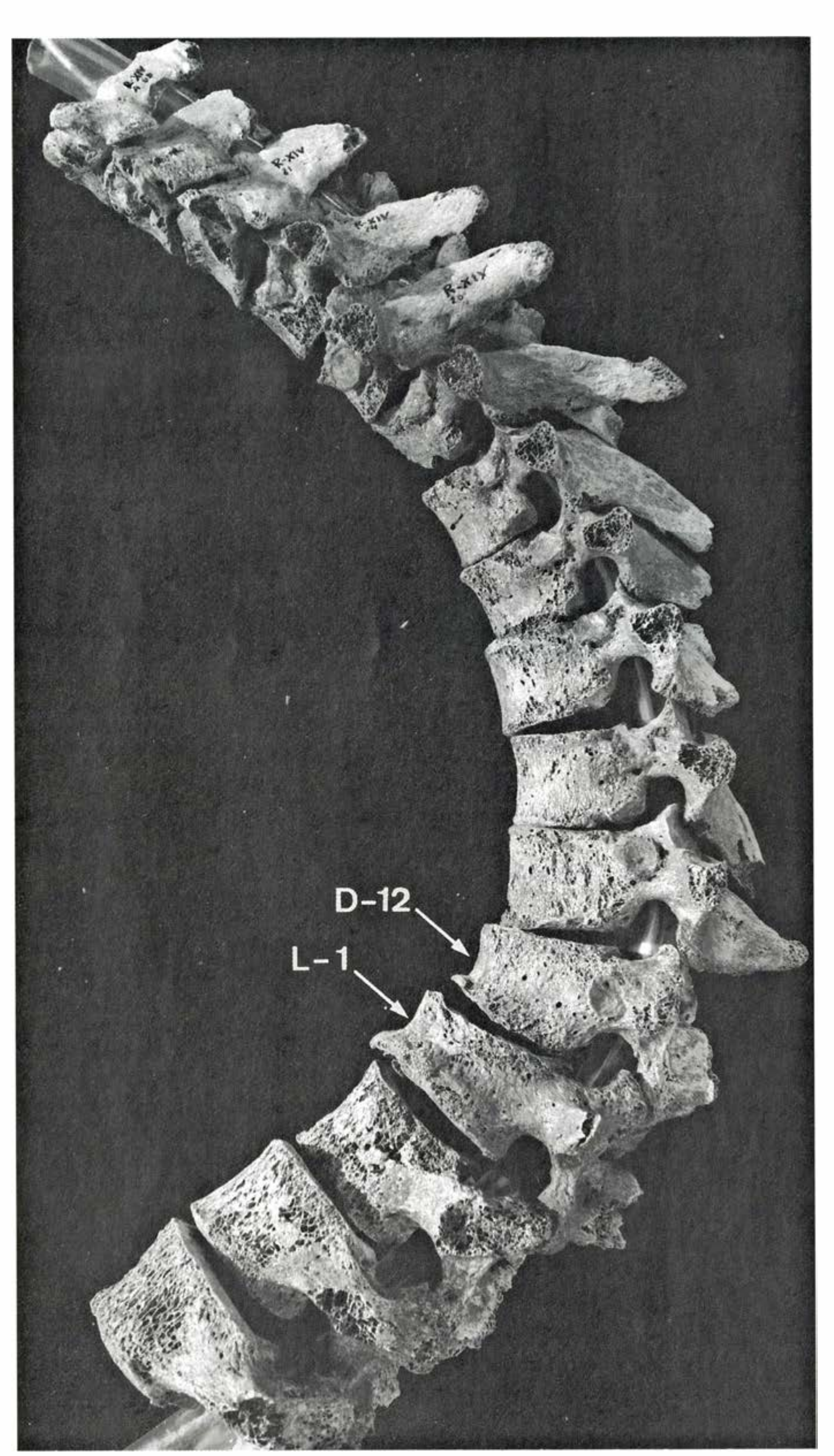
En paleopatología, la dificultad mayor para detectar cuantas lesiones hemos descrito hasta ahora consiste en que, en general, la angulación de la columna no se debe sólo a la deformación del cuerpo vertebral, sino también al disco, que ya ha desaparecido; además, puesto que en estos casos las vértebras tienen una menor resistencia, lo corriente es que varias de ellas estén parcial o totalmente destruidas. Todos estos factores conllevan que, al intentar reconstruir la columna con sus curvaturas, podemos caer en el terreno de la patología fantástica por falsear la silueta de la columna.

Las malformaciones que el paleopatólogo encuentra en su trabajo son de dos tipos: uno numérico, en el que está alterada la composición de los distintos segmentos de la columna, por haber más, o menos, vértebras que las de la especie; otro segundo, relativo a la morfología intrínseca de una o más vértebras. No es infrecuente la coexistencia de ambos tipos de anomalías en un mismo individuo.

El número de vértebras cervicales es constante, siete, en el hombre y en todos los mamíferos. (También los jiráfidos, aunque parezca sorprendente, solamente tienen siete vértebras cervicales, debiéndose la gran longitud de su cuello a la mayor altura de cada vértebra.) Las anomalías más frecuentes consisten en la lumbarización de la primera sacra o en la sacralización de la quinta vértebra lumbar, pudiendo también ocurrir que se lumbarice la duodécima lumbar o se dorsalice la primera lumbar. Sin embargo, importa aclarar que el número de vértebras del tronco permanece constante: 12 dorsales + 5 lumbares + 5 sacras = 22; el aumento o la reducción del número de vértebras en un sector se realiza a expensas del territorio vecino. La anomalía más frecuente es la sacralización de la quinta lumbar (21 por ciento), que puede ser completa o bien afectar a un solo lado (hemisacralización). La lumbarización de la primera sacra representa sólo el 1

por ciento de los casos. Todas estas anomalías sectoriales pueden ser asintomáticas; ahora bien, la hemisacralización y, con algo menos de frecuencia, la sacralización, provoca la aparición de lumbalgias.

La espina bífida es un defecto de soldadura congénito que afecta al arco vertebral. La alteración puede limitarse al hueso o estar asociada a una malformación de la médula y sus cubiertas (mielomeningocele). Aunque esta anomalía puede tener lugar en cualquier nivel de la columna, tiene su mayor incidencia en las dos últimas vértebras lumbares y en las primeras sacras. Las espinas bífidas, muy frecuentes, suelen cursar asintomáticas. Los mielomeningoceles entrañan, sin embargo, una reconocida gravedad, e incluso en nuestros días la mortalidad es elevada y las complicaciones muy importantes, datos suficientes para afirmar que en la prehistoria y tiempos antiguos la mortalidad debió ser del 100 por ciento, con supervivencia máxima de pocos días. Como quiera que los huesos al nacer aún no están bien conformados, la confirmación de este proceso es difícil, salvo que se trate de una momia.



7. TRAUMATISMO VERTEBRAL por hiperflexión y deformación de Kümmel. Afecta a la duodécima vértebra dorsal (D-12) y a la primera lumbar (L-1). Necrópolis medieval de Santa María de Ripoll.

Las anomalías congénitas más frecuentes suelen ser las fusiones de dos o más cuerpos vertebrales y el llamado síndrome de Klippel Feil, o ausencia de un hemicuerpo. En algunos individuos la primera vértebra cervical (atlas) se suelda al hueso occipital, anomalía que se conoce con el nombre de asimilación del atlas; cuando esto ocurre, suelen existir otras malformaciones: la platibasia, la impresión basilar y la de Arnold-Chiari, entre otras.

Al abordar los traumatismos, los paleopatólogos distinguen entre las fracturas sufridas en vida y las póstumas. Cuando en la fractura los signos de regeneración ósea son evidentes, aquélla se produjo obviamente durante la vida del sujeto y la supervivencia a la misma fue más o menos prolongada. Signo de regeneración que aparece al estudio radiográfico es la presencia de una moderada condensación ósea en los bordes de la fractura.

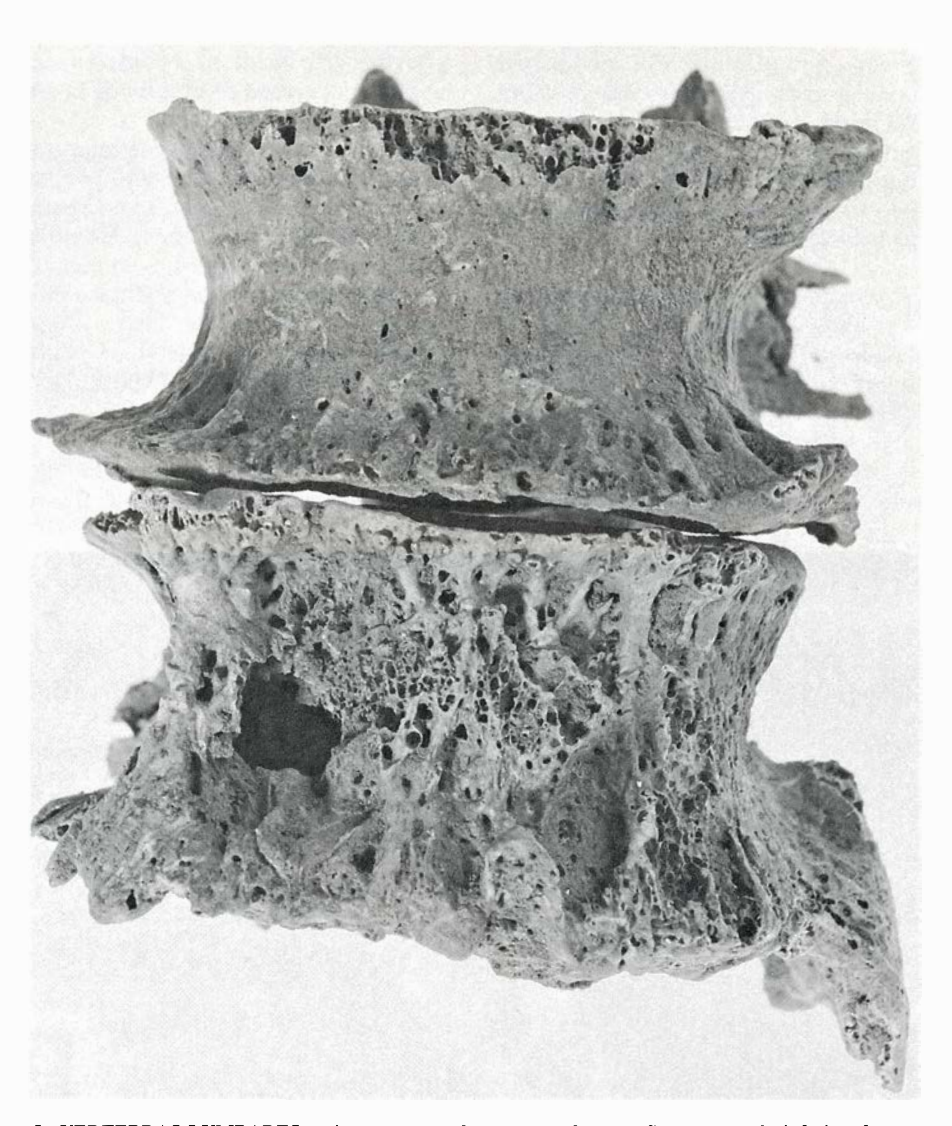
Las cosas se complican cuando en una fractura no se aprecian a la inspección visual ni en la radiografía señales de que la reparación se ha iniciado. En la mayoría de los casos sólo cabe aventurar conjeturas antes de decidir si se produjo o no en vida. Recuérdese que la mayoría de los restos esqueléticos presentan fracturas producidas por causas muy diversas: presión de tierras, caída de bloques de piedra, deterioro póstumo del hueso por elementos o sustancias químicas del suelo envolvente, maniobras intempestivas durante los trabajos de desenterramiento, etc.

Con el transcurso del tiempo los huesos adquieren una pátina por impregnación de sustancias que se adhieren a la superficie de contacto. Si la fractura es reciente, sobre todo si se produce a lo largo de la excavación, la línea de fractura carece de dicha pátina y su coloración es distinta. Otro factor que apoyará el diagnóstico de fractura póstuma

será su presencia en aquellas zonas donde el hueso se deteriora con más facilidad por el paso de los años, concretamente en las epífisis de los huesos largos donde predomina el tejido esponjoso, que cuando se seca pierde su consistencia.

Las lesiones traumáticas en la columna vertebral son frecuentes. Débense a una contusión directa, a lesiones por hiperflexión y a heridas por armas punzantes o cortantes. Las dos primeras a menudo se dan juntas. Se han descubierto fracturas vertebrales en ictiosaurios y otros reptiles del secundario. En el hombre las hay en todos los períodos.

Las contusiones directas pueden dar lesiones muy variadas según su intensidad y el punto donde incidan. En el impacto, siempre posterior, pueden fracturarse las distintas porciones del arco vertebral, apófisis espinosas, apófisis transversas, láminas, articulaciones y pedículos. Si el golpe es muy intenso puede fracturarse el cuerpo vertebral o luxarse. La diferencia entre fractura y luxación estriba en que en ésta hay un desplazamiento vertebral. En los grandes traumatismos, las complicaciones letales son la norma, pero en los casos de supervivencia, sobre todo si es prolongada, tiene lugar una consolidación más o menos concreta que puede ser detectada en un examen meticuloso. Las fracturas seguidas de muerte inmediata se confunden con las póstumas (por deterioro después de la muerte).



8. VERTEBRAS LUMBARES, primera y segunda, con grandes osteofitos que, en la inferior, forman columnas. En ésta se observa la presencia de una cavidad necrótica, conocida por "pico de loro". Estas lesiones son de origen artrósico. Pertenecen a un individuo de época romana del Mas d'En Rofes.

Las lesiones por hiperflexión se producen al sobrepasar los límites de elasticidad de la columna. Predominan en la región dorsolumbar, donde las vértebras más afectadas suelen ser D-12 y L-1. El traumatismo lesiona una vértebra, generalmente se trata de una pequeña fractura, y en el transcurso de unas semanas aparece dolor y el cuerpo vertebral adquiere una morfología cuneiforme. Es lo que se conoce con el nombre de enfermedad de Kümmel, el primero que las describió. En paleopatología este tipo de lesiones se constatan con frecuencia. Probablemente, algunas de las cifosis que se reproducen en el arte primitivo fueron de origen traumático.

Las caídas de pie o sentado originan, a veces, aplastamientos vertebrales, que frecuentemente afectan a una sola vértebra. Este tipo de lesión da origen a una artritis postraumática que se sigue de una anquilosis entre las vértebras vecinas, que forman un bloque.

Los traumatismos intensos se hacen más frecuentes a medida que nos acercamos en el tiempo: el hombre ha refinado su violencia en la guerra, ha ideado armas contundentes más eficaces y se sirvió del caballo, con los derribos consiguientes.

Heridas por armas punzantes y cortantes se han demostrado a partir del Paleolítico superior. Se han encontrado puntas de flecha o lanza de piedra o de metales incrustadas en los cuerpos vertebrales, tanto en el hombre como en los animales. En algunos casos, las lesiones a nivel de la columna cervical son concluyentes, prueba clara de que el individuo fue decapitado. En algunos reptiles herbívoros de la Era Secundaria se han encontrado en sus vértebras las huellas del reptil depredador que le ocasionó la muerte.

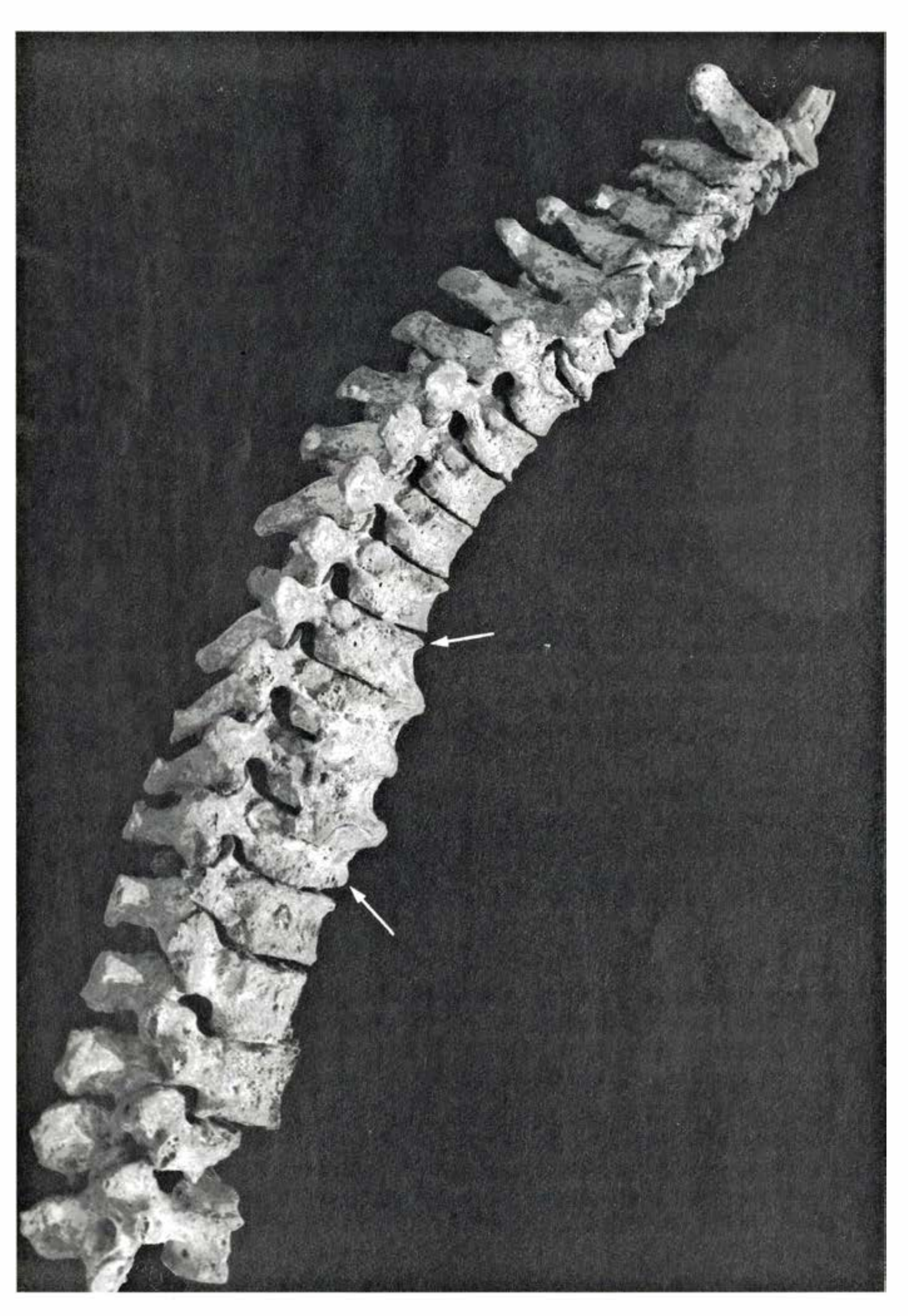
¿Qué decir de las enfermedades infecciosas? Numerosos gérmenes pueden infectar al hueso dando lugar a osteomielitis, con abscesos intraóseos y extraóseos y, en ocasiones, formación de secuestros (fragmentos de hueso necrosado que queda en el interior de una cavidad abscesal y que suele eliminarse al exterior a través de una fístula). Se llama osteomielitis a las infecciones del hueso. Gérmenes habituales implicados en la lesión de la columna son los estafilococos, la *Brucella melitensis* (agente causal de las fiebres de Malta) y el *Mycobacterium tuberculosis* (bacilo de Koch). Todos estos gérmenes producen osteomielitis.

El agente causal de la osteomielitis estafilocócica es el estafilococo dorado, germen ampliamente difundido y causante habitual de forúnculos y otras muchas afecciones. La osteomielitis vertebral predomina de forma franca en el varón en la proporción de 4 a 1. El lugar preferente de ataque se circunscribe a la columna lumbar.

La osteomielitis brucelósica vertebral es una afección relativamente fre-

cuente, sobre todo en el medio rural por ingestión de leche cruda de cabra. En períodos anteriores al Neolítico no parece probable que esta infección fuese frecuente; por la obvia razón de que surgiría con la domesticación del ganado caprino.

La tuberculosis ósea es conocida de antiguo. Existía ya en el Egipto faraónico en el 3700 a.C. El agente causal es el *Mycobacterium tuberculosis*, descubierto por Roberto Koch en 1882. De entre los varios tipos de bacilos tuberculosos que hoy en día se conocen, sólo dos afectan al hombre: el humano y bovino; éste incide en el ganado vacuno que actúa como reservorio de la enfermedad. Durante mucho tiempo se pensó que la enfermedad fue importada en el continente americano por los colonizadores y que por tanto no existía en la América precolombina. Estudios recientes parecen demostrar lo contrario. No se conocen casos seguros en los períodos prehistóricos del Viejo Mundo, aunque en opinión de Clark desde el Neolítico (6000 a 7000 a.C.) la tuberculosis sería endémica en la especie humana. La tuberculosis puede afectar a cualquier hueso. Cuando ataca a la columna vertebral provoca el denominado mal de Pott, en honor de su descubridor; trátase, además, de la localización preferente de la tuberculosis ósea (del 25 al 50 por ciento). En el niño, su localización preferente es la columna dorsal superior y la lumbar, mientras que en el adulto es la lumbar, preferentemente la primera vértebra. Parece ser que el foco inicial de infección es la médula ósea próxima al disco intervertebral en las proximidades de la cara anterior, pudiendo dar lugar a la formación de una caverna y abscesos osifluentes. La debilidad de la vértebra o vértebras afectadas causa una intensa deformación de la columna, que puede comprimir la médula espinal originando graves complicaciones neurológicas. Posteriormente, al perder el cuerpo vertebral consistencia, se produce una angulación hacia adelante. Cuando el proceso cura, deja una cifosis interna; generalmente se sinostosan las vértebras contiguas afectadas. Gran número de jorobados lo son por esta causa. Algunos casos se mencionan en papiros egipcios. Las representaciones de jorobados en el arte de las antiguas culturas es numerosa y, con toda probabilidad, algunos de ellos se debían al mal de Pott. Nosotros sólo hemos encontrado una vértebra lumbar en que se manifiesta con toda nitidez el mal.



9. ESPONDILOARTROSIS GENERALIZADA en un individuo de la necrópolis del Real Monasterio de Santa María de Ripoll. Los osteofitos anteriores que comprenden las vértebras séptima a décima (*flechas*) forman un bloque; adquieren, pues, una importancia mayor que las cervicales y lumbares.

Un grupo especial en la paleopatología lo forman las afecciones reumatoideas. La palabra reumatismo resulta, empero, un término vago, que abarca diversas afecciones, que tienen en común incidir sobre las articulaciones y músculos, dando lugar a dolor e impotencia funcional. Se trata de enfermedades predominantemente inflamatorias. En la artritis hay que distinguir las de causa conocida y las de etiología desconocida. Las primeras son de origen bacteriano; de las más importantes nos hemos ocupado al hablar de las enfermedades infecciosas. Las artrosis, aunque suelen asociarse a inflamación, son de etiología traumática, frecuentemente secundarias a pequeños traumatismos en relación con la forma de vida del individuo y su actividad laboral.

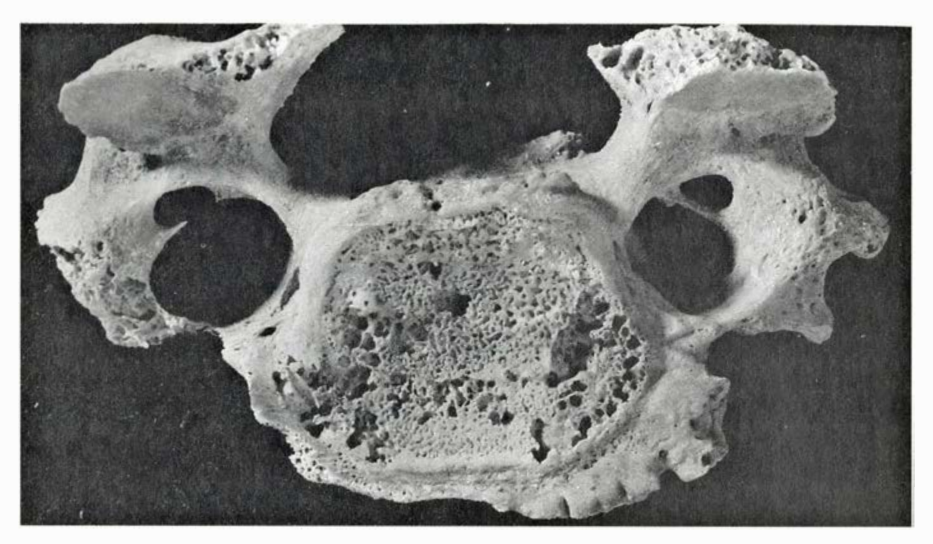
La columna paga un fuerte tributo a estos procesos, siendo las artrosis más frecuentes, sobre todo cuando se avanza en edad. Puede decirse que, a partir de los cuarenta años, todas las personas tienen, en un grado más o menos avanzado, artrosis. En paleopatología resulta difícil separar las lesiones artríticas de las artrósicas, aunque en éstas el desgaste óseo y la reacción osteogénica acostumbran a ser más intensos. Los

casos conocidos son muy numerosos y corresponden a todas las épocas; algunos ejemplos se remontan a reptiles del secundario. Abundan entre los fósiles humanos.

En la columna vertebral la artrosis predomina en la región lumbar (en la cuarta y quinta) y en la región cervical (en las tres últimas). En el plano dorsal afecta a la parte anterior de los cuerpos vertebrales. Entre las lesiones artrósicas más frecuentes destacan las de tipo productivo que dan lugar a osteofitos, picos de loro y otras excrecencias óseas. Llegan a constituir incluso una verdadera corona alrededor del cuerpo vertebral. En ocasiones los osteofitos, que son excrecencias óseas, se unen entre sí y establecen puentes óseos que juntan dos o más vértebras. En algunos casos, las plataformas de los cuerpos vertebrales sufren una gran erosión, hasta el punto de perder la capa compacta; tampoco resulta infrecuente la aparición de cavitaciones necróticas en el interior de los cuerpos. La gota, por último, no suele afectar a la columna vertebral.

Entre las enfermedades reumatoideas debemos recordar la espondiloartritis anquilopoyética de Bechterew: una artritis crónica de las pequeñas articulaciones vertebrales que consiste en la osificación de los ligamentos intervertebrales; afecta sobre todo a los adolescentes del sexo masculino. Los ligamentos que unen estas articulaciones, tras su anquilosis, se calcifican. Aunque la enfermedad no afecta de forma exclusiva a la columna, las lesiones predominan con claridad en ésta.

No proliferaban las neoplasias en la prehistoria. Las razones que se pueden aducir son varias. Posiblemente en la actualidad ha aumentado el número de las neoplasias malignas porque múltiples factores las propician. La menor longevidad de los pueblos antiguos hacía que estas enfermedades, que predominan a partir de la madurez, no se manifestaran. Una segunda dificultad consiste en que la mayoría de los carcinomas óseos primitivos o metastásicos (secundarios) son osteolíticos (destructores de hueso) y no osteogénicos (productores de hueso), lo que redunda en una pérdida de consistencia del hueso, que se hace menos resistente al deterioro propio del paso del tiempo. Una última razón de tipo técnico: por su aspecto macroscópico y radiográfico, lesiones distintas pueden dar imágenes parecidas que nos harán dudar del diagnóstico. En el polo opuesto, la osteoporosis se caracteriza por una atrofia del tejido óseo con reabsorción de las trabéculas, que aparecen adelgazadas. Resulta muy ostensible en el tejido esponjoso, mientras que en el compacto lo más evidente es su adelgazamiento. En el examen microscópico, los canales de Havers –centro de la aposición de los osteoblastos– están dilatados.



10. VERTEBRA CERVICAL con desaparición del hueso compacto que recubre la cara superior del cuerpo y gran corona osteofítica inferior. Es de un individuo de época romana del Mas d'En Rofes.

La osteoporosis tiene predilección por la columna vertebral, aunque puede afectar a cualquier hueso ya que el proceso suele ser generalizado. Da lugar a un aumento de las curvaturas y secundariamente a una disminución de la talla. Esta enfermedad predomina en las mujeres, en las que suele presentarse después de la menopausia. En ambos sexos suele ser común en la edad senil.

No se habla mucho de osteoporosis en paleopatología. Ello es explicable: cuando los huesos están fracturados, la tierra suele rellenar los espacios y su limpieza es difícil. Cuando no se da esta circunstancia, los huesos rotos se presentan muy deteriorados y es fácil que se trate de pseudosteoporosis. En los huesos enteros el problema está en que no es posible radiografiar sistemáticamente todo el material, pues sería muy oneroso.

El raquitismo es otra de las enfermedades óseas que pueden afectar a la columna, dando lugar a cifosis o cifoescoliosis. Enfermedad genuina de la civilización surge cuando el hombre habita ciudades con calles estrechas, en las que el sol apenas penetra, desventaja que no conoció el hombre que vivía al aire libre. Se han diagnosticado distintos casos; en particular los publicados por Morel y Demetz, pertenecientes a la alta Edad Media francesa.

Por deficiente asimilación del calcio se produce la osteomalacia. Se trata de una enfermedad probablemente secundaria a una alimentación insuficiente asociada a trastornos intestinales, que afecta sobre todo a los niños y adolescentes. La cifoescoliosis es típica de esta enfermedad. Otra característica que puede observarse es la presencia de las "vértebras de pez" descritas por Schmorl: vértebras que semejan dos conos unidos por su base.

La enfermedad de Paget es una osteitis deformante, que consiste en procesos de reabsorción y neoformación del tejido óseo de forma anárquica, con engrosamiento final del hueso; afecta a la columna vertebral, sobre todo a nivel lumbar. Las vértebras, en la radiografía, muestran unos contornos desdibujados, por lo que se las denomina "vértebra en croquis". Se tiene constancia de su presencia a nivel del cráneo y de la tibia.

A lo largo de este trabajo hemos podido constatar la abundancia de paleopatología que se detecta en los restos antiguos, a pesar de que no hemos pretendido una labor exhaustiva. De ello se desprende que casi toda la patología ósea puede incidir en la columna. Sin embargo, la paleopatología tiene unas importantes limitaciones, que en muchas ocasiones impide llegar al diagnóstico con certeza, pues no se puede recurrir a los estudios histológicos, serológicos, bacteriológicos y demás que están al alcance del patólogo moderno; hemos de valernos, casi exclusivamente, de la inspección visual y de la radiografía. El principal problema está en que enfermedades muy distintas pueden dar lesiones parecidas.

Biología molecular de las vacunas de la malaria

El estudio de los genes que codifican las moléculas de la cubierta externa del parásito de la malaria pone de manifiesto una clase de proteínas que forman sitios antigénicos repetidos. ¿Son señuelos para eludir la respuesta inmunitaria?

G. Nigel Godson

A principios de la década de 1960, y durante varios años, se creyó estar a punto de controlar la malaria, un viejo azote de la humanidad. La aplicación extensiva de DDT (diclorodifenil-tricloroetano) pulverizado iba reduciendo la población del mosquito *Anopheles*, y se disponía de nuevas drogas, como la cloroquina, para el tratamiento de los pacientes infectados.

Veinte años más tarde, la malaria resurge de nuevo. Su agente causal, el protozoo parásito *Plasmodium*, está desarrollando resistencia a las drogas y, el vector del parásito, la hembra del mosquito *Anopheles*, se está volviendo resistente al DDT y otros insecticidas. En la actualidad la enfermedad aflige a entre 200 y 400 millones de personas, en una amplia franja tropical que rodea la tierra. En Africa mata directamente a más del 10 por ciento de sus víctimas, y al resto las debilita; es la causa principal de las tasas de mortalidad en la primera infancia, que se elevan hasta el 50 por ciento. No cabe duda de la urgente necesidad de atajar de nuevo la malaria. El principal empeño consiste en explotar los instrumentos que brinda la biología molecular para desarrollar vacunas contra la malaria y otras vías para combatir al parásito.

Para resultar eficaz, la vacuna debe instar al sistema inmunitario a que fabrique anticuerpos que ataquen y neutralicen el parásito. El desarrollo de tal vacuna no va a ser fácil. En regiones de Africa donde la enfermedad es endémica, gran parte de la población sufre infección crónica de una u otra especie del parásito o bien se está viendo sometida a reinfectación por parte del ubicuo mosquito. Esas personas desarrollan abundantes anticuerpos contra el parásito, pero son pocas las que adquieren inmunidad protectora. La razón es que *Plasmodium*, aun en los breves períodos en que no se halla a salvo del sistema inmunitario de su hospedador humano (en las células del hígado o en los glóbulos rojos de la sangre), muestra tendencia a evadir la respuesta inmunitaria. Los estudios sobre la biología molecular de *Plasmodium* han empezado a poner de manifiesto cómo lo logra y a sugerir nuevas formas de evadir los mecanismos de escape del parásito. Es de esperar que, en un futuro no lejano, puedan utilizarse vacunas preparadas por ingeniería genética y otras armas moleculares y que, en última instancia, se logre erradicar la malaria.

Dos especies de *Plasmodium* son agentes importantes de la malaria humana: *P. falciparum* (el más abundante y letal) y *P. vivax*. En el transcurso de su ciclo biológico en sus hospedadores, mosquito y humanos, el parásito unicelular sufre una impresionante serie de cambios morfológicos y de desarrollo. El estadio en el que infecta al hombre, el esporozoíto en forma de lanza, reside en las glándulas salivares del mosquito y se deposita en el torrente sanguíneo de la víctima cuando el insecto se alimenta de la sangre. Al cabo de una hora, el esporozoíto inicia su camino hacia una célula hepática; allí sufre una serie compleja de transformaciones. En cierto momento, una célula gigante multinucleada, el esquizonte, se divide por escisión en merozoítos, casi esféricos. De lo cual resulta un enorme aumento del número de parásitos: una célula del hígado infectada por un esporozoíto libera al torrente sanguíneo de 5000 a 10.000 merozoítos.

Cada merozoíto invade un glóbulo rojo de la sangre y en él se multiplica asexualmente hasta que la célula estalla y libera de 10 a 20 nuevos merozoítos, que van, de nuevo, a invadir otros glóbulos rojos. Esa periódica lisis de los glóbulos rojos, con la concomitante liberación de merozoítos y de productos tóxicos de desecho, son la causa de las fiebres recurrentes y de los escalofríos de la malaria.

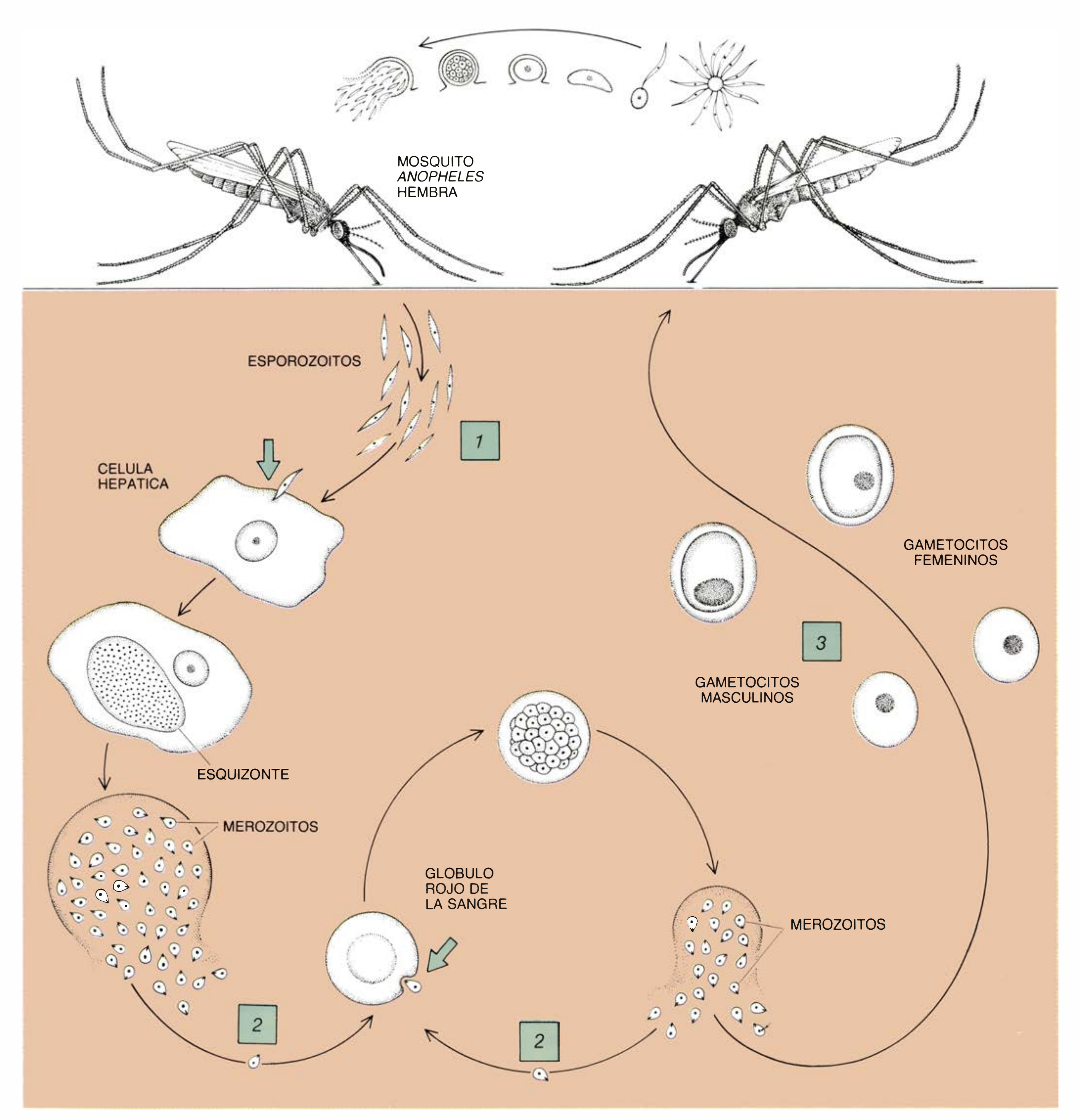
Algunos merozoítos, al desarrollarse, dan gametocitos masculinos y femeninos (precursores de las células germinales) iniciándose con ello el ciclo sexual del parásito. Los gametocitos los absorbe el mosquito junto con los glóbulos rojos sanguíneos, maduran en el tracto digestivo y se fusionan para formar un zigoto. El zigoto sufre también otra serie de divisiones, transformaciones y migraciones y, en última instancia, en la glándula salivar del mosquito, aparece un esporozoíto maduro dispuesto a iniciar un nuevo ciclo infectivo.

Cada estadio del desarrollo de *Plasmodium* presenta una forma característica y un conjunto distintivo de funciones: habita un microambiente determinado e interactúa con un tejido específico que sirve de blanco. Para el biólogo molecular, ello significa que, aunque todos los estadios poseen el mismo genoma, o complemento de genes, en cada uno de los estadios se expresa una parte diferente del genoma: se van poniendo en funcionamiento o desconectando genes diferentes, en un orden programado.

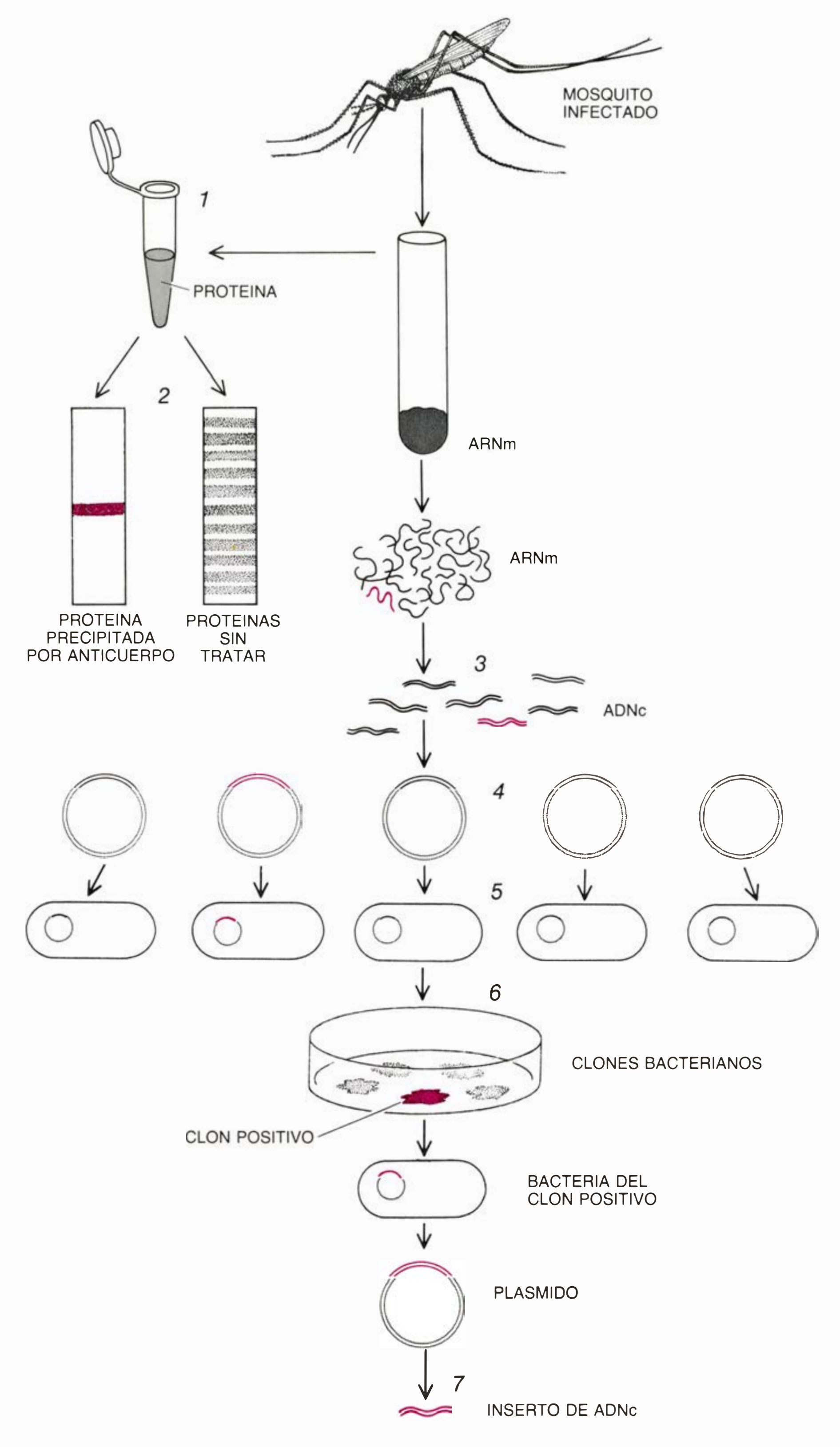
El gen consta de ADN, una doble hélice cuyos filamentos complementarios están formados por subunidades denominadas nucleótidos. Cada nucleótido se caracteriza por poseer una de las siguientes cuatro bases: adenina (*A*), guanina (*G*), timina (*T*) y citosina (*C*). La información genética está codi-

ficada en la secuencia u orden de sucesión de las bases. Un gen se expresa cuando un filamento de su ADN se transcribe a un filamento complementario de ARN mensajero (ARNm), que, a su vez, se traduce a una secuencia de aminoácidos: una proteína.

Una vía de estudio del desarrollo de un organismo, en el nivel molecular, consiste en aislar genes que se están expresando en un determinado estadio del desarrollo y analizar su estructura y la de la proteína que codifican. En el caso de *Plasmodium*, ese tipo de estudios se ha enfocado hacia la superficie del parásito. Por una razón: las proteínas de la capa externa de la célula son altamente específicas de cada estadio; se expresan sólo en una única fase del desarrollo. Por tanto, sus genes deben estar sometidos a una estricta regula-



1. EL PARASITO DE LA MALARIA, *Plasmodium*, atraviesa numerosos estadios durante su complejo ciclo de vida en el vector, un mosquito *Anopheles* hembra, y el hospedador mamífero. El esporozoíto, inyectado por el mosquito, invade inmediatamente una célula hepática, donde se transforma en un gigantesco esquizonte multinucleado. Este se divide por fisión y la célula hepática libera millares de merozoítos. Cada merozoíto invade un glóbulo rojo de la sangre, y en él se multiplica; la célula estalla, liberando de 10 a 20 merozoítos, que invaden más glóbulos rojos. Algunos merozoítos se trasforman en gametocitos masculinos y femeninos (precursores de las células germinales) que irán a parar, con la sangre, a otro mosquito. Al cabo de una serie de transformaciones posteriores, aparecen esporozoítos maduros en la glándula salivar del mosquito, donde quedan a disposición para repetir un ciclo infectivo. Podría diseñarse una vacuna encaminada a provocar la formación de anticuerpos que atacasen a los esporozoítos, a los merozoítos o a los gametocitos, en los instantes en los que esas formas circulan libres por la sangre (*1, 2, 3*). También podrían diseñarse agentes que bloquearan la invasión de las células hepáticas o las células sanguíneas (*flechas de color*), o que mataran a los parásitos dentro de las células. (Dibujo de Patricia J. Wynne.)



2. BUSQUEDA DEL GEN que codifica la proteína circunsporozoíto (*CS*) del parásito de la malaria del mono, *Plasmodium knowlesi*. Se partió de la extracción de ARN mensajero (ARNm) de mosquitos infectados con el parásito. Para detectar el mensajero de la proteína *CS*, parte del ARNm mixto se tradujo primero a una proteína marcada radiactivamente (*1*). La mitad de la proteína se sometió a precipitación con un anticuerpo monoclonal contra la proteína *CS* y, la otra mitad, se dejó sin tratamiento. Se separó las proteínas por electroforesis en gel (*2*). La presencia de una banda de proteína, que precipitaba el anticuerpo (*color*) confirmó la presencia del ARNm de la proteína *CS*. Se sometió el ARNm total a transcripción inversa (*3*) para obtener ADN copia (ADNc), que se insertó en plásmidos (*4*). Se introdujo en células bacterianas los plásmidos recombinantes (*5*), se cultivaron las bacterias (*6*) y se ensayó los clones resultantes frente al anticuerpo contra la proteína *CS* [*véase la figura 4*]. Algunos clones habían expresado la proteína (*color*), por lo que se aislaron y examinaron sus plásmidos. Se encontró que tres de ellos transportaban insertos de ADNc del parásito, que codificaban parte de la proteína del esporozoíto (*7*).

ción cuyos mecanismos son de considerable interés fundamental. Otra razón es que esas proteínas son antígenos de superficie y que, como tales, es muy probable que estén implicadas en el desencadenamiento (o en la evasión) de la respuesta inmunitaria del hospedador. El estudio de esos genes resulta, por tanto, de importancia para comprender el mecanismo de esa expresión génica específica de cada estadio y, por añadidura, también para desarrollar vacunas contra la malaria, específicas para un determinado estadio del desarrollo.

Hace algunos años, mis colegas y yo, del Hospital Clínico de la Universidad de Nueva York, empezamos a aislar y estudiar los genes que codifican el principal antígeno de superficie de los esporozoítos, la proteína denominada circumsporozoíto (*CS*). La proteína había sido estudiada durante muchos años por Ruth S. Nussenzweig, de la Universidad de Nueva York, y se había comprobado que era específica de un estadio: sólo la sintetizaban los esporozoítos. Es la principal proteína sintetizada por los esporozoítos en la glándula salivar y cubre toda la superficie de la célula. Elegimos para nuestro trabajo a *P. knowlesi*, el agente de la malaria del mono, debido, en gran parte, a que la especie de *Anopheles* que lo transporta genera unas 10 veces más esporozoítos que un mosquito infectado con uno de los parásitos humanos. Los mosquitos infectados nos fueron proporcionados por Robert W. Gwadz y Louis H. Miller, del Instituto Nacional de Alergia y Enfermedades Infecciosas de los Estados Unidos (NIAID), quienes facilitan a investigadores del mundo entero material relacionado con el parásito de la malaria.

Para aislar un gen específico de un estadio en activo suele partirse del ARNm total del estadio en observación, por lo que comenzamos por ensayar varios métodos, bastante laboriosos, encaminados a separar, del mosquito infectado, el material correspondiente al esporozoíto. Advertimos que, en lugar de tener que purificar los esporozoítos, podíamos partir del ARNm total de los mosquitos infectados (o de su tórax). En la mezcla de ARNm de esporozoíto y de mosquito detectábamos el ARNm que codifica la proteína *CS* y, por tanto, podíamos clonar directamente el gen del parásito a partir del ARNm total.

Utilizando la enzima transcriptasa inversa, el ARNm total se retrotranscri-

bió a ADN copia (ADNc). Se insertó los fragmentos del ADNc en plásmidos (pequeños anillos de ADN bacteriano), en medio de un gen que codificaba una proteína plasmídica. Cabía esperar, por tanto, que un plásmido recombinante que llevase incorporado el ADNc del parásito expresara un producto de la fusión que fuese en parte proteína plasmídica y en parte proteína del parásito.

Los plásmidos recombinantes se introdujeron en la bacteria *Escherichia coli*. Se cultivaron las bacterias y los clones (colonias descendientes de una sola célula) resultantes se sometieron a ensayo utilizando anticuerpos monoclonales contra la proteína *CS*, siguiendo un procedimiento inmunológico de dos sitios, desarrollado por Fidel P. Zvala, de la Universidad de Nueva York. Joan Ellis, alumna de mi laboratorio, encontró tres clones a los que se unía el anticuerpo, señal de que esas bacterias habían sintetizado una proteína de fusión activa.

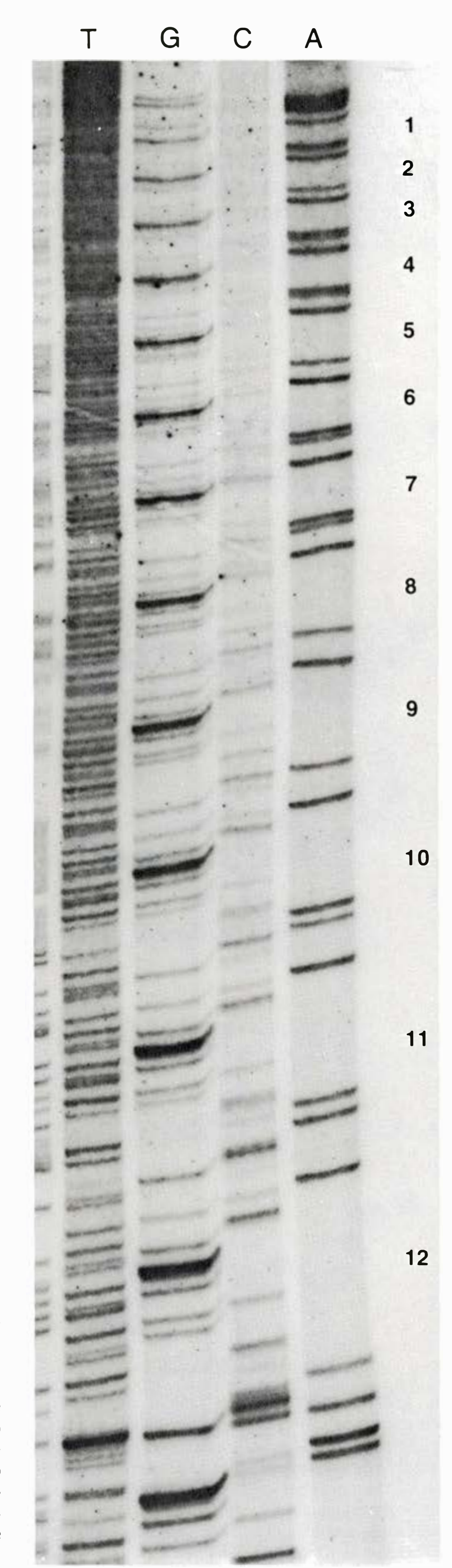
Al analizarse los plásmidos presentes en los clones bacterianos positivos, encontramos que el fragmento de ADNc del esporozoíto insertado en uno de ellos era sumamente corto: solamente constaba de 340 pares de bases, esto es, su longitud no permitía más que la síntesis de unos 110 aminoácidos (pues cada aminoácido viene especificado por un codón de tres nucleótidos). Se trataba de un hallazgo fantástico y con notables ramificaciones. Significaba que ese pequeño fragmento de ADNc del esporozoíto contenía la región del gen que codifica la parte inmunorreactiva de la proteína *CS*: el epitopo, o sitio de combinación con el anticuerpo.

A fin de localizar con mayor precisión la región codificante del epitopo en el pequeño inserto de ADNc, recurrimos al procedimiento denominado de mutagénesis con transposones. Se emplean en esta técnica de mapaje transposones bacterianos: diminutos fragmentos de ADN, que a menudo codifican un gen de resistencia a algún antibiótico, y que pueden saltar de un plásmido a otro casi de una manera aleatoria. Un transposón inactiva la función del gen que se halla allende el punto de inserción; así, anotando en el mapa genético los sitios que provocan una desactivación, se pueden delimitar regiones funcionales de los genes. Siguiendo esta metodología, James R. Lupski, otro alumno de mi laboratorio, logró demostrar que el sitio de combinación del antígeno estaba codificado dentro de un segmento de unos 110 pares de bases de longitud, y en el extremo izquierdo (lo que se denomina extremo 5') del inserto de 340 pares de bases.

Pamela Svec determinó luego la secuencia de nucleótidos del inserto de 340 pares de bases. Ante nuestro asombro, resultó que el inserto completo estaba formado por repeticiones en tándem de una sola secuencia de 36 pares de bases de longitud; había siete unidades repetitivas completas, con unidades incompletas en cada uno de los extremos. Examinados los otros dos clones a los que se había unido el anticuerpo contra la proteína *CS* (aquellos en los que los insertos de ADNc de esporozoíto eran más largos), encontramos que esos insertos también incorporaban múltiplos de la unidad de 36 pares de bases. Dado que la unidad repetitiva era común a los tres clones positivos, parecía claro que debía codificar el epitopo de la proteína *CS*. El propio epitopo debía ser una cadena de 12 aminoácidos repetidos en tándem, es decir, una estructura notable y completamente nueva para un antígeno de superficie.

Ignorábamos todavía la secuencia de aminoácidos del epitopo. Conocíamos la secuencia de nucleótidos, pero no podíamos traducirla a una secuencia de aminoácidos porque no sabíamos cuál era la fase de lectura, es decir, la forma en que debe dividirse la hilera de nucleótidos en codones que especifiquen aminoácidos. Dado que un codón es un triplete de nucleótidos, existen tres posibles fases de lectura para cada filamento de ADN y, por tanto, seis posibles pautas de lectura de la doble hélice.

Establecimos cuál era el filamento codificante y dedujimos la fase de lectura al localizar la unión entre el ADN de *Plasmodium* y la secuencia, conocida, de nucleótidos del gen de la proteína del plásmido. Conocida la pauta de lectura, podíamos ya traducir la secuencia de nucleótidos y obtener la de los 12 aminoácidos del epitopo. El siguiente paso lógico consistía en ensamblar un péptido sintético (una breve cadena de proteína), correspondiente a la secuencia derivada, e intentar la mímesis de las propiedades inmunitarias de la proteína natural de superficie del esporozoíto.

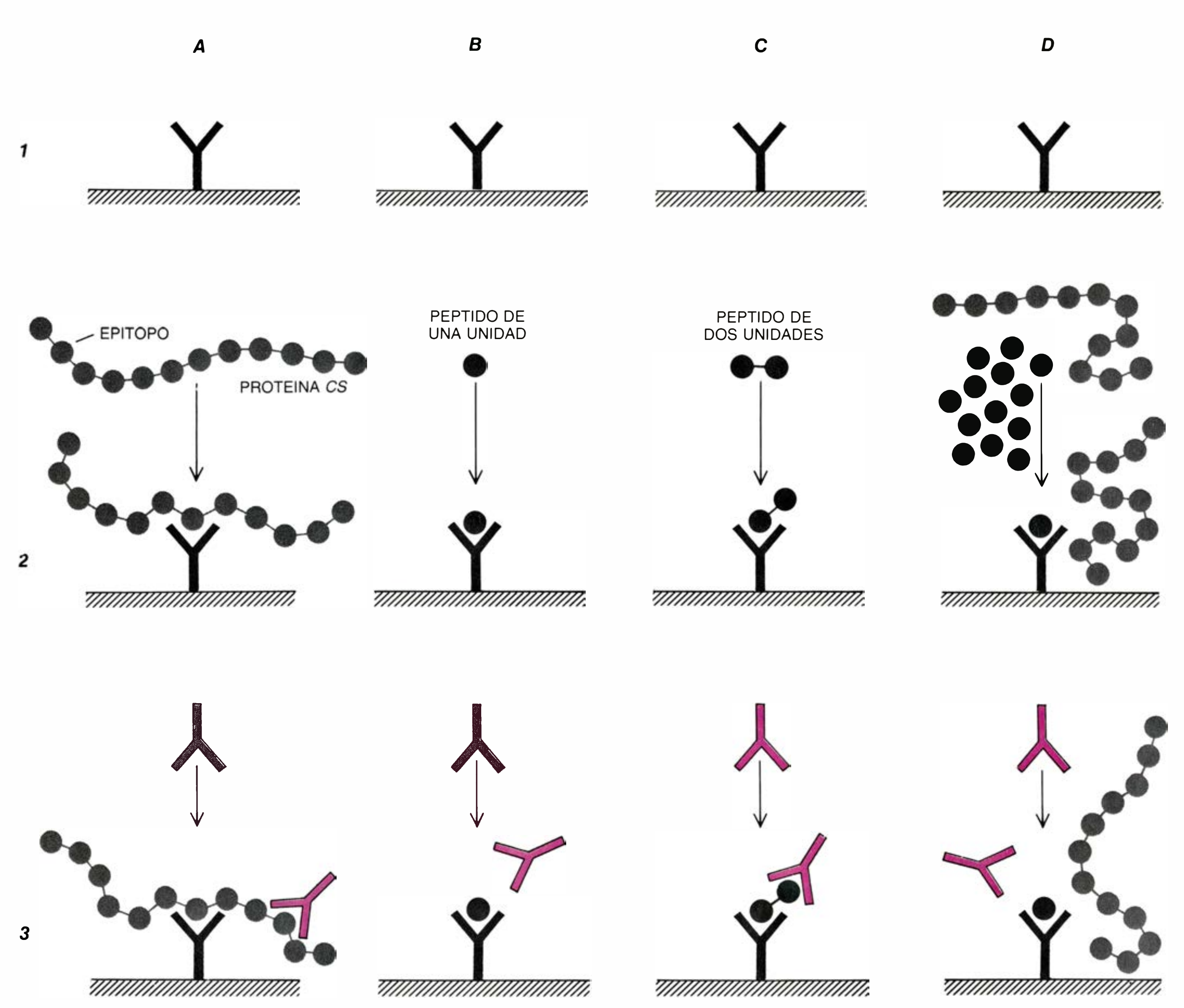


3. SE OBSERVARON PEPTIDOS REPETIDOS al determinar la secuencia de nucleótidos de un inserto de ADNc que codificaba la proteína *CS*. Las cuatro columnas de la autorradiografía corresponden a las frecuencias de las cuatro subunidades (*T*, *G*, *C*, *A*) de las que consta el ADN. Incluso antes de leer la secuencia, resultaba evidente, de acuerdo con el modelo reiterativo, que esa parte del gen codificaba 12 repeticiones en tándem de un pequeño péptido. El péptido constituye un epitopo, o determinante antigénico: un sitio específico de la proteína al que se une un anticuerpo. Esta región de la proteína es, por tanto, un epitopo múltiple.

David H. Schlesinger, de la Universidad de Nueva York, ensambló los aminoácidos correspondientes al epitopo de 12 aminoácidos, así como una unidad peptídica doble, de 24 aminoácidos de longitud. El ensayo inmunológico mostró que el péptido sintético de unidad doble se unía al anticuerpo monoclonal contra la proteína *CS*. En un ensayo competitivo, el péptido sintético de unidad sencilla no solamente se unió al anticuerpo, sino que, al hacerlo, bloqueaba la unión normal del anticuerpo a la superficie del esporozoíto [*véase la figura 4*]. Estos resultados establecían, de forma concluyente, que el péptido de 12 aminoácidos podía constituir el epitopo del antígeno de superficie de *P. knowlesi*, o que lo contenía. Este último resultó ser el caso ya que, en posteriores experimentos realizados con Victor Nussenzweig y Schlesinger, mostramos que los péptidos sintéticos que constaban solamente de ocho de los doce aminoácidos contiguos portaban toda la información necesaria para una completa interacción antígeno-anticuerpo.

Llegados aquí, lo conseguido no era poco. Se había determinado la secuencia del epitopo; se había establecido la pauta de lectura de todo el gen de la proteína *CS* y se habían obtenido péptidos sintéticos que mimetizaban la región inmunorreactiva de la proteína. Al inyectar los péptidos en ratones y conejos, se mostraban altamente inmunógenos, es decir, estimulaban la formación de anticuerpos. Quedaba por demostrar que los anticuerpos proporcionaran inmunidad protectora (en cuyo caso el péptido podría constituir la base de una vacuna antimalaria), para lo cual había que proceder a ensayos con animales así como a los subsiguientes estudios de biología molecular sobre el antígeno de superficie.

Los siguientes objetivos, por tanto, eran establecer la estructura del gen completo de la proteína *CS* (no la

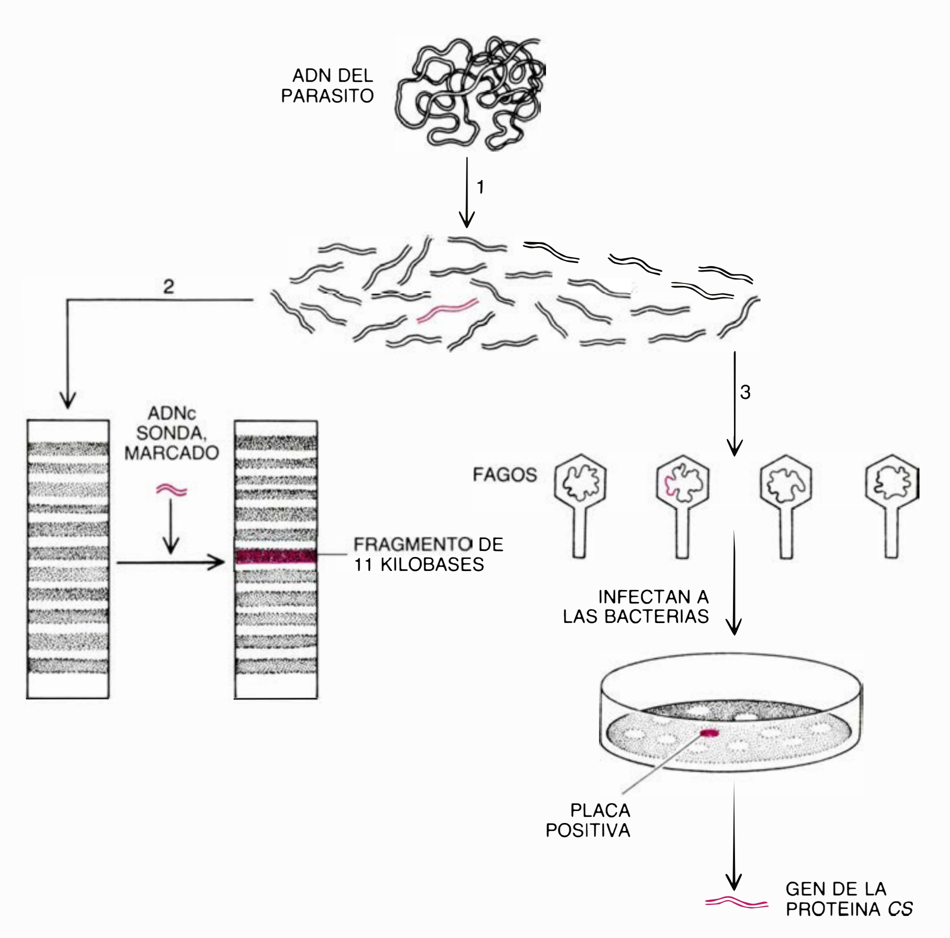


4. ANTICUERPO MONOCLONAL contra la proteína *CS*, que sirve para detectar clones que expresen la proteína (*A*) y para ensayar péptidos sintéticos y verificar la secuencia, previamente deducida, del epitopo (*B-D*). Se adsorbe anticuerpo sin marcar sobre una superficie sólida (*1*). Se detecta un clon positivo (*A*) cuando un epitopo de la proteína *CS* que expresa el clon se une al anticuerpo (*2*); la unión de la proteína se pone de manifiesto por el engarce de una copia marcada del mismo anticuerpo a un segundo epitopo de la proteína (*3*). Cuando un péptido sintético aislado (de 12 aminoácidos) se une al anticuerpo absorbido (*B*), no ofrece un segundo sitio para la fijación del anticuerpo marcado. El péptido doble (24 aminoácidos), sin embargo, proporciona un segundo sitio (*C*), por lo que el anticuerpo marcado sí puede establecer unión con él. En un ensayo competitivo (*D*), el péptido aislado y concentrado satura los sitios de unión de los anticuerpos adsorbidos, con lo que bloquea la unión de la verdadera proteína *CS*. Se demuestra así que el péptido obtenido sintéticamente y la proteína elaborada por el parásito compiten por el mismo anticuerpo y que deben poseer indénticos sitios de combinación con éste.

de un ADNc obtenido en el laboratorio, sino la del gen real, tal como se encuentra en el cromosoma del parásito) y deducir la secuencia completa de aminoácidos de la proteína y, luego, su estructura. Luiz S. Ozaki fragmentó el ADN genómico del parásito, separó los fragmentos de acuerdo con su tamaño, por electroforesis, y los transfirió a un filtro de nitrocelulosa. Sondeó el filtro con uno de nuestros ADNc plasmídicos. El ADNc sonda hibridó (se unió) con un fragmento complementario de ADN ubicado en un segmento de 11.000 nucleótidos de longitud del genoma del parásito. Se demostraba así que el gen para la proteína *CS* estaba en ese segmento.

Después de aislar el fragmento de 11 kilobases (por clonación) y de establecer su estructura global (por mapaje con enzimas de restricción), determinamos la secuencia completa de nucleótidos de la región que contenía el gen del antígeno de superficie. Los datos procedentes del mapaje y de la secuencia nos llevaron a dos conclusiones. Primera, a pesar de la vasta amplificación de la expresión de la proteína *CS* que, según se sabía, tenía lugar durante el estadio de esporozoíto, el genoma del parásito constaba solamente de un gen para la proteína. Segunda, la región codificadora del gen, a diferencia de lo que ocurre con la mayoría de los genes de eucariotas (organismos superiores a las bacterias), no estaba interrumpida por intrones, regiones no codificantes intercaladas en la secuencia, que se eliminan al madurar el ARNm. La falta de intrones sugería que *Plasmodium* quizá fuera un eucariota muy primitivo.

Establecida la pauta de lectura y conocida la secuencia completa de nucleótidos del gen de la proteína *CS*, podíamos deducir la estructura de los aminoácidos de la proteína. Aproximadamente el 45 por ciento de la proteína constaba de repeticiones de la unidad de 12 aminoácidos del epitopo. En algunos aspectos, otras porciones de la proteína coincidían con lo que cabría esperar de una proteína de superficie. El extremo del lado izquierdo (el extremo terminal NH_2) poseía la secuencia señal, fuertemente hidrófoba (que repele el agua) característica de las proteínas exportadas a través de la membrana de una célula. El otro extremo (el terminal COOH) era una cola hidrófoba (que, de forma típica, ancla una proteína de superficie a la membrana celular); iba precedida de cuatro aminoácidos (cisteínas) entre los que pueden formarse enlaces disulfuro para



5. AISLAMIENTO DEL GEN COMPLETO DE LA PROTEINA *CS*. Se digirió con una enzima el genoma (ADN total) del esporozoíto (*1*). En un gel se separaron los segmentos atendiendo a su tamaño (*2*) y se utilizó un inserto marcado de ADNc correspondiente a la proteína *CS* para comprobar que el gen se encontraba en un fragmento (*color*) de 11 kilobases. Se aisló por clonación ese fragmento (*3*). Se introdujeron las piezas de ADN en un virus bacteriano, el fago lambda; los fagos infectaron bacterias cultivadas en una placa Petri. Al multiplicarse, cada fago provocó la aparición de una placa de lisis sobre el césped de bacterias. Utilizando de nuevo como sonda el inserto marcado de ADNc, se identificaron las placas que contenían el fragmento de 11 kilobases. El gen de *CS* se aisló a partir de una placa positiva.

enlazar segmentos de la proteína, configurando una estructura globular, o bien para unir entre sí moléculas adyacentes de la proteína.

El peso molecular de la proteína, calculado a partir de la secuencia de aminoácidos, resultaba, sin embargo, sustancialmente menor que el peso determinado en función de la tasa de migración de la proteína en un gel. Esos y otros hallazgos sugerían que la proteína *CS* debía tener propiedades físicas peculiares. Algunas de ellas cabría deducirlas a partir de la secuencia de aminoácidos de la unidad repetitiva. El péptido tenía tres glicocolas, tres alaninas, tres glutaminas y un ácido aspártico, una prolina y una asparragina. Dispuestos en dos dimensiones, los aminoácidos polares, pequeños (hidrófilos), alternaban con los hidrófobos, grandes. Tal alternancia es también característica de una subunidad repetitiva, de seis aminoácidos, de la fibroína, la principal proteína de la seda. La cadena de fibroína se repliega sobre sí misma hacia delante y hacia atrás, con segmentos sucesivos antiparalelos y unidos por puentes de hidrógeno. Esa configuración, una lámina plegada, da a la fibra su naturaleza flexible.

Valiéndonos de modelos moleculares, mostramos que los péptidos repetitivos de la proteína *CS* podían formar una estructura similar, de lámina plegada. La cadena de péptidos se doblaría en cada prolina (donde con frecuencia giran fuertemente las cadenas de proteína) de manera que las sucesivas unidades zigzaguearan repetidamente en direcciones opuestas [*véase la figura 7*]. Los enlaces de hidrógeno se formarían espontáneamente; los tamaños de los aminoácidos de las cadenas laterales alternaban de tal modo que las cadenas laterales que sobresalían no se interferirían unas a otras. La lámina beta debería ser muy estable. En colaboración con Schlesinger y Walter A.

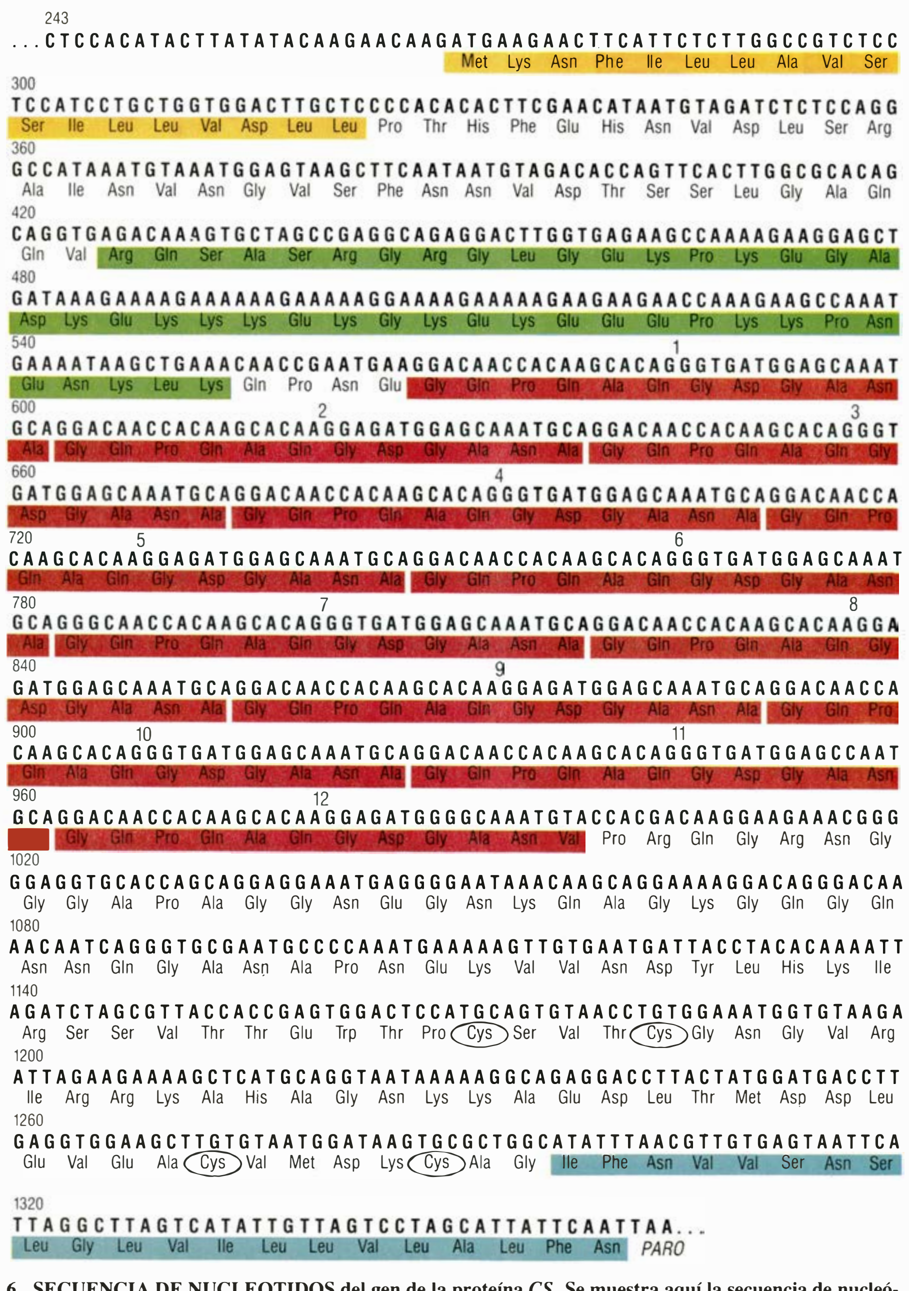
Gibbons, de la Universidad de Londres, hemos confirmado recientemente algunas de las predicciones de esta estructura propuesta experimentalmente. Cuando se sintetizan péptidos correspondientes a dos, tres y cuatro repeticiones en tándem (24, 36 y 48 aminoácidos), muestran considerable estructura beta, importante indicio de que así ocurre en la proteína natural.

Si las repeticiones de una sola molécula de proteína *CS* pueden plegarse en zig-zag para formar una lámina, las moléculas adyacentes deberían ser capaces de interactuar de manera similar (como en la fibroína). Ello daría una estructura superficial en la que las moléculas se plegarían sobre sí mismas e interactuarían para formar una red: una estructura protectora ideal para un parásito. Se trata de algo más que una barrera física. Parece que la proteína *CS* promueve la evasión, por parte del esporozoíto, de las defensas del cuerpo; y lo hace, en primer lugar "enfocando" la respuesta inmunitaria, concentrándola en un solo blanco en detrimento de que pueda hallar otras dianas. Son varias las pruebas realizadas que apuntan hacia esta estrategia.

Cuando a un animal de experimentación se le inyectan esporozoítos, la mayoría de los anticuerpos que produce están dirigidos contra la proteína *CS* y, de forma específica, contra el epitopo repetitivo; son escasos los indicios de que el sistema inmunitario reconozca cualquier otra parte de la proteína de superficie. Lo cual sugiere que la cadena de proteína está plegada de tal manera que sólo el 45 por ciento de la cadena que lleva el epitopo repetitivo queda expuesto en la superficie. Por tanto, cada molécula de proteína sólo presenta al sistema inmunitario un sitio vulnerable, pero este sitio se repite 12 veces. El sistema inmunitario reconoce múltiples dianas idénticas sobre la misma molécula; los otros posibles blancos son relativamente inaccesibles.

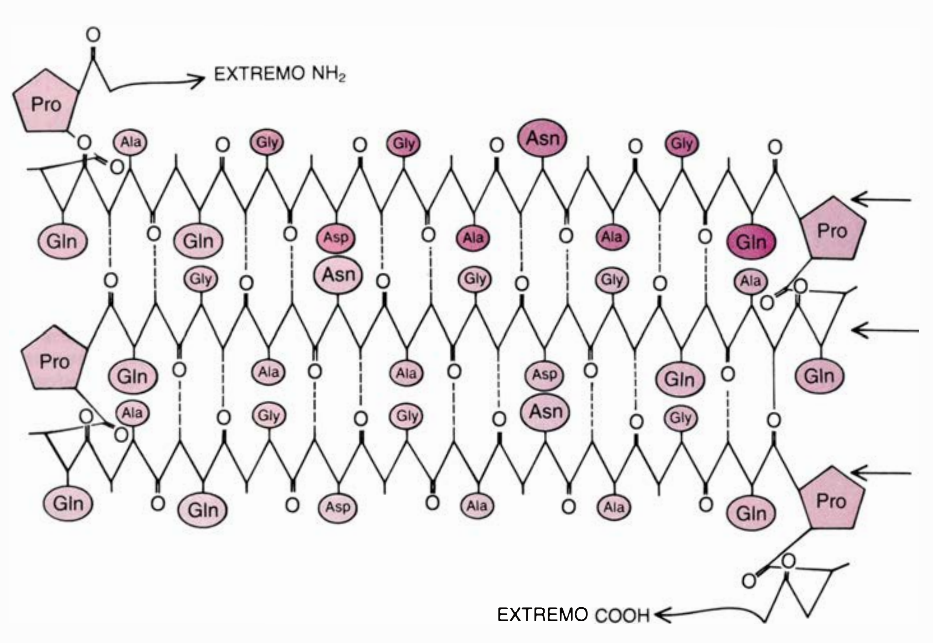
El epitopo repetitivo viene a ser, por tanto, un señuelo múltiple. Además, es renovable. Hace bastantes años, Jerome P. Vanderberg, de la Universidad de Nueva York, observó que los esporozoítos expuestos a anticuerpos antiesporozoítos parecían desprenderse de una cubierta superficial discontinua. Tal cubierta se distingue, en las micrografías electrónicas, como una gruesa capa vellosa que recubre la célula; presumiblemente sea la red de moléculas de proteína *CS*. Hay pruebas evidentes de que la cubierta del esporozoíto se desprende continuamente y de que, sin cesar, se restaura con proteína recién fabricada secretada a la superficie. Resulta notable que la proteína *CS* se fabrique en grandes cantidades, correspondiendo a ella del 10 al 30 por ciento del total de proteína sintetizada por el esporozoíto en la glándula salivar del mosquito. El sistema inmunitario probablemente se vea forzado a montar un ataque mayor de lo normal, debido a la presencia de numerosos epitopos y a que la cubierta de superficie se remplaza continuamente. Además, las moléculas desechadas, especialmente si forman una red, deben actuar de señuelo adicional, que tiende trampas al sistema inmunitario, pues éste las reconoce como si fuesen parásitos vivos y fabrica más anticuerpos.

Todo ello quizá dé tiempo a los esporozoítos inyectados por un mosquito para que encuentren cobijo en las células del hígado, aun cuando el hospedador tenga ya en circulación anticuerpos antiesporozoítos instados por una in-



6. SECUENCIA DE NUCLEOTIDOS del gen de la proteína *CS*. Se muestra aquí la secuencia de nucleótidos correspondiente a la porción traducida y, con ella, la secuencia de aminoácidos deducida. La proteína tiene una región señalizadora hidrófoba (*amarillo*) que promueve su paso a través de la membrana celular del esporozoíto, y una región de aminoácidos básicos (*verde*). A continuación se halla la región de unión con el anticuerpo (*rojo*): 12 repeticiones en tándem de un epitopo de 12 aminoácidos. Las secuencias de los epitopos repetidos son casi idénticas. La mayoría de las escasas diferencias entre nucleótidos, como las existentes en los tripletes que codifican la glutamina (*Gln*) y la glicocola (*Gly*) centrales, no se traducen en alteración de la secuencia de aminoácidos; solamente la valina (*Val*) final es una sustitución. Dos pares de cisteínas, que pueden formar enlaces disulfuro, preceden a la región hifrófoba de anclaje (*azul*).

fección anterior. Tal mecanismo de escape sería especialmente apropiado para un estadio del parásito, como el de esporozoíto, en el que queda expuesto al sistema inmunitario sólo durante un breve intervalo de tiempo. Por el contrario, un parásito expuesto prolongadamente a los anticuerpos, como le ocurre al tripanosoma, probablemente deba cambiar sus antígenos de superficie para que el sistema inmunitario no logre atraparlo [véase "Así cambia *Tripanosoma* su cubierta", por John E. Donelson y Mervyn J. Turner; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, abril de 1985]. Sin embargo, esta variación antigénica requiere tiempo, mientras que una proteína que actúe de señuelo para el sistema inmunitario puede proteger al parásito desde el momento en que aparece en el hospedador.



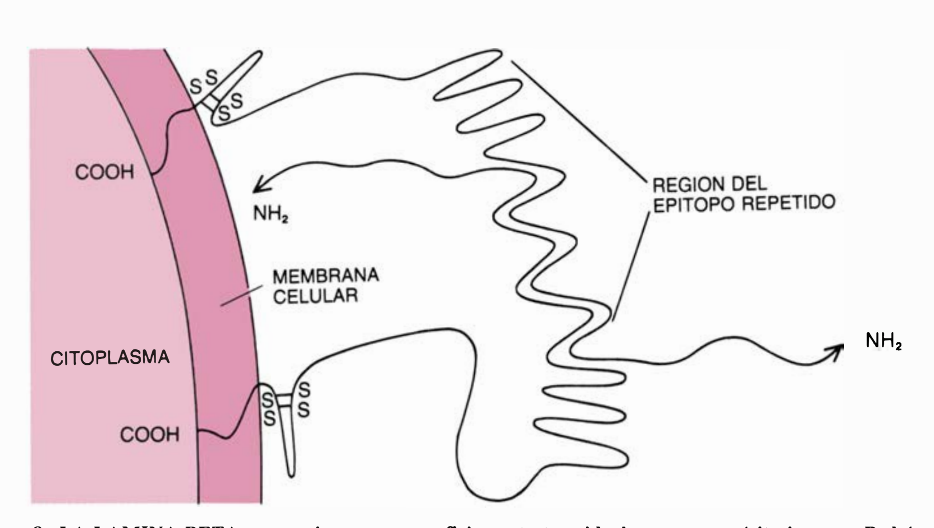
7. CONFIGURACION de la región del epitopo repetido (el señuelo inmunitario); puede predecirse a partir de su secuencia de aminoácidos. Es probable que se trate de una lámina plegada en beta, en la que una cadena polipeptídica se repliega sobre sí misma adelante y atrás, y en la que segmentos adyacentes de la cadena están unidos por puentes de hidrógeno, formando una estructura (*líneas a trazos*) en forma de lámina. La cadena se plegaría curvándose fuertemente en cada prolina (*Pro*). Tanto el tamaño como la carga de los aminoácidos que sobresalen sugieren que no interferirán entre sí. Según se ha comprobado, 8 aminoácidos contiguos (*color oscuro*) bastan para interactuar con el anticuerpo contra la proteína *CS*.

Poco tiempo después de que describiésemos el antígeno de superficie del esporozoíto de *P. knowlesi*, otro, notablemente similar, se aisló de un estadio diferente (el estadio de merozoíto en la sangre) del parásito de la malaria humana, *P. falciparum*. Trabajando con ARNm de parásitos en la forma en que se encuentran en la sangre y con suero de personas que habían sido expuestas repetidamente al parásito, David J. Kemp, Robin F. Anders y Graham F. Mitchell y sus colegas, del Instituto de Investigación Médica Walter y Eliza Hall, de Australia, lograron clonar y expresar cierto número de genes del antígeno de superficie del merozoíto.

Uno de ellos era el gen de un antígeno *S* de merozoíto, una proteína de superficie que forma una capa vellosa que recubre al merozoíto cuando sale de un glóbulo rojo que se lisa. Como ocurría en nuestro gen de la proteína *CS*, existe una repetición múltiple. En el gen del antígeno *S*, la secuencia repetitiva es de 33 pares de bases de longitud (y por tanto codifica un péptido repetitivo de 11 aminoácidos, en lugar de 12) y la secuencia se repite en tándem más de 100 veces (en lugar de 12). Como la proteína *CS*, el antígeno *S* parece ser una proteína que actúa de señuelo inmunitario, que se secreta y destruye continuamente y que presenta un epitopo repetido al sistema inmunitario.

Desde la caracterización de la proteína *CS* de *P. knowlesi* y el antígeno *S* de *P. falciparum*, se han aislado otras cinco proteínas superficiales de *Plasmodium*. El trabajo lo han efectuado Kemp y sus colegas, en Australia; el grupo de Miller, en el NIAID, en colaboración con un grupo del Instituto Walter Reed de Investigación del Ejército; Jeffrey V. Ravetch, del Memorial-Sloan Kettering Cancer Center; Gunter Blobel, de la Universidad Rockefeller; Luis Pereira da Silva, del Instituto Pasteur, y Benno Müller-Hill, de la Universidad de Colonia. Todas esas proteínas tienen un péptido unidad que se repite en tándem [*véase la figura 9*]. La mayoría de los péptidos repetitivos contienen una prolina, lo que deja abierta la posibilidad de que el movimiento de zig-zag en la prolina facilite la formación de una lámina plegada en beta en todos los antígenos de superficie de los plasmodios.

Parece claro que muchas de las principales proteínas de superficie, tanto de esporozoítos como de merozoítos, son señuelos inmunitarios y que los anticuerpos por ellos inducidos no son protectores: no incapacitan al parásito. Probablemente explique ello por qué la infección natural raramente se



8. LA LAMINA BETA proporciona una superficie protectora ideal para un parásito invasor. Podría derivar de interacciones intramoleculares e intermoleculares. La cadena polipeptídica de una molécula de proteína *CS* podría plegarse y unirse a sí misma por enlaces de hidrógeno, o bien a la cadena plegada de una molécula adyacente. El dibujo sugiere cómo podrían interactuar las moléculas incorporadas a la membrana de la célula del parásito para formar parte de una red que constituye su cubierta más externa.

ESPOROZOITOS		
P. KNOWLESI	PROTEINA *CS*	Gly Gln Pro Gln Ala Gln Gly Asp Gly Ala Asn Ala (12)
P. FALCIPARUM	PROTEINA *CS*	Asn Ala Asn Pro (41)
ESTADIOS EN LA SANGRE		
P. FALCIPARUM	ANTIGENO *S*	Pro Ala Lys Ala Ser Gln Gly Gly Leu Glu Asp (100-110)
	ANTIGENO *RESA*	Glu Glu Asn Val Glu His Asp Ala
	ANTIGENO *FIRA*	Val Thr Thr Gln Glu Pro
	ANTIGENO *PF*-11	Glu Glu Val Val Glu Glu Val Val Pro
P. LOPHURAE	PROTEINA RICA EN His	Ala Pro His_8 Asp Ala His_8

9. SIETE PROTEINAS DE SUPERFICIE de diversas especies y estadios de *Plasmodium* se han aislado y caracterizado hasta la fecha. Todas ellas presentan epitopos repetidos, cuyas secuencias se muestran aquí. Igualmente se indica el número de repeticiones para las tres proteínas en las que se conoce.

traduce en la adquisición de inmunidad protectora. También permite concluir que las vacunas diseñadas para estimular anticuerpos contra esos principales antígenos de superficie probablemente no constituyan los mejores candidatos para inducir inmunidad duradera.

Debe haber, sin embargo, vías eficaces de ataque al parásito. A juzgar por la multiplicidad de anticuerpos antiplasmoidales encontrados en la sangre de personas con malaria, son muchas las proteínas de superficie, específicas de cada estadio, que quedan aún por aislar y caracterizar. La mayoría de ellas probablemente se dirijan contra los merozoítos o contra la superficie de los glóbulos rojos infectados (a los que, de alguna manera, el merozoíto que los infecta exporta algo de su antígeno), pero otras pueden ser constituyentes minoritarios de la superficie del esporozoíto o del gametocito; a diferencia de los antígenos principales, presumiblemente no constituyan señuelos inmunitarios. Muchos laboratorios colaboran en un esfuerzo encaminado a aislar los genes que codifican esos antígenos de superficie minoritarios, valiéndose de procedimientos de clonación, como los descritos más arriba. El problema será, luego, saber si alguno de ellos induce anticuerpos protectores.

Sin duda el parásito resulta más vulnerable cuando está libre en el torrente sanguíneo, en busca de una célula hepática o un glóbulo rojo. En tres estadios de ese tipo puede resultar eficaz una vacuna. Una vacuna antiesporozoíto sería ideal: rompería el eslabón entre el mosquito y el hombre, estimulando la fabricación de anticuerpos capaces de atacar al esporozoíto en el momento de iniciarse la infección, antes de que pueda llegar a las células del hígado. Una vacuna antimerozoíto estimularía un ataque sobre el parásito a mitad de la infección; en conjunción con una vacuna antiesporozoíto, establecería una segunda línea de defensa. Una vacuna antigametocito rompería la unión que cierra el ciclo entre el hombre y el mosquito.

Existen también caminos para atacar al parásito cuando no está libre en el torrente sanguíneo. La mejor oportunidad se puede presentar durante la invasión de una célula hepática o un glóbulo rojo. Para reconocer estas células y penetrar en ellas, el parásito debe detectar y utilizar algún receptor específico de la superficie de la célula diana. El esporozoíto o el merozoíto deben estar equipados con una molécula de reconocimiento o, como ha sugerido Vanderberg, quizá tomen del suero del hospedador una glicoproteína que sirva a ese propósito. Cuando se conozcan los detalles del proceso de invasión, tal vez pueda desarrollarse un análogo de la molécula de reconocimiento o un anticuerpo contra la molécula receptora de la célula. Cualquiera podría unirse al receptor y bloquear la invasión. De conocerse la ruta de la invasión, quizá se logre desarrollar un agente que mate al parásito mientras esté dentro de la célula hepática o sanguínea.

El estudio molecular de *Plasmodium* está todavía en pañales, pero ya ha permitido recabar información sobre el parásito y apunta nuevos caminos para combatirlo. Por un lado, un enfoque molecular, en el nivel del ADN, trata de identificar mecanismos peculiares del parásito de la malaria, alguno de los cuales quizá constituya su talón de Aquiles. Por otro lado, el poder de la biología molecular se basa en el reconocimiento de que los mecanismos fundamentales de la expresión génica y la estructura celular son comunes a todas las formas de vida, y en que lo que se conoce de un sistema biológico es aplicable a todos los demás. En medicina, muchos avances aplican conocimientos nuevos de mecanismos generales para resolver problemas médicos específicos, al tiempo que aportan información que contribuye a profundizar en las cuestiones básicas.

Así explota una supernova

Cuando una estrella agota su combustible nuclear, la parte central de la misma se contrae en milisegundos y su "rebote" subsiguiente origina una onda que arrastra consigo la mayor parte de la materia estelar

Hans A. Bethe y Gerald Brown

La muerte de una gran estrella es un suceso brusco y violento. La estrella evoluciona pacíficamente durante millones de años, pasando por diversas fases de desarrollo, pero cuando se le acaba su combustible nuclear se contrae bajo su propio peso en menos de un segundo. Los sucesos más importantes de la fase de colapso transcurren en milisegundos. Lo que sigue es una supernova, una explosión prodigiosa, la más potente de las que se han producido desde que se formó el universo, si exceptuamos la "gran explosión" originaria.

Una sola estrella en explosión puede fulgurar con más brillo que una galaxia entera, compuesta por miles de millones de estrellas. En el curso de meses, logra emitir tanta luz cuanta despide el Sol en mil millones de años. Además, la luz y otras formas de radiación electromagnética representan sólo una porción pequeña de la energía total de una supernova. La energía cinética de la materia en explosión es 10 veces mayor. Más energía todavía –tal vez el céntuplo de la emisión electromagnética– transportan las partículas carentes de masa llamadas neutrinos, emitidos en su mayoría en un relámpago que dura alrededor de un segundo. Cuando termina la explosión, la mayor parte de la masa de la estrella se ha repartido por el espacio; del núcleo central de la misma sólo quedan cenizas, oscuras y densas. En algunos casos, hasta puede desaparecer sumido en un agujero negro.

En sus líneas generales, esa descripción de la supernova podría haberse dado treinta años atrás, pero la sucesión pormenorizada de los acontecimientos en una estrella moribunda no se conoce con cierta seguridad ni siquiera hoy. El nudo de la cuestión es el siguiente: si la supernova comienza con un colapso, o implosión, ¿cómo puede, entonces, expulsar la mayor parte de la masa de la estrella? En algún momento, el movimiento de caída hacia dentro de la materia estelar debe detenerse y luego invertirse; la implosión debe transformarse en explosión.

Está empezando a perfilarse un cuadro coherente del mecanismo de la supernova mediante combinación de simulaciones con ordenador y análisis teóricos. Por lo que parece, el suceso crucial en el punto de retorno sería la formación de una onda de choque que se propagaría hacia fuera, a una velocidad mínima de 30.000 kilómetros por segundo.

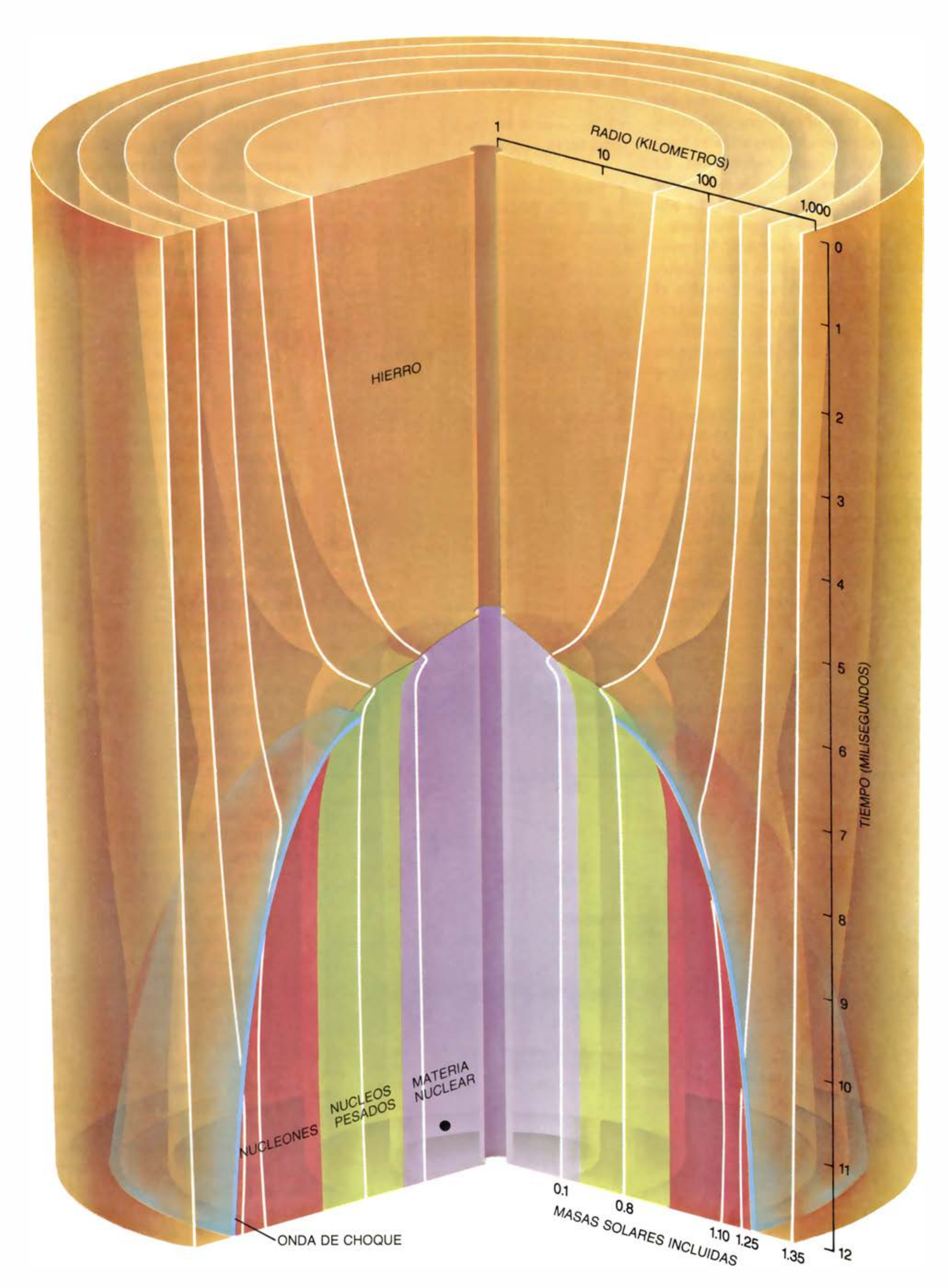
Las supernovas son sucesos raros. En nuestra propia galaxia se han registrado sólo tres a lo largo de los últimos 1000 años; la más brillante, anotada por astrónomos chinos en el año 1054, originó la capa de gas en expansión conocida por Nebulosa del Cangrejo. Si solamente se pudiesen observar sucesos tan próximos, poco se sabría acerca de ellas. Pero gracias a su extraordinaria luminosidad, se detectan incluso en galaxias lejanas; los astrónomos identifican unas 10, más o menos, cada año.

Las primeras observaciones sistemáticas de supernovas distantes las realizó en los años treinta Fritz Zwicky, del Instituto de Tecnología de California. La mitad aproximadamente de las supernovas que estudió se ajustaban a un patrón bastante regular: la luminosidad aumentaba constantemente durante unas tres semanas y disminuía después poco a poco durante un período de seis meses o más. A las explosiones de esta clase las llamó de tipo I. A las restantes supernovas, más variadas, las dividió en cuatro grupos; hoy se las agrupa en el tipo II. Se cree que los acontecimientos que conducen a la explosión son muy diferentes en los tipos I y II. Aquí nos ocuparemos principalmente de las segundas.

El punto de apoyo de la teoría de las explosiones de supernova fue un trabajo de Fred Hoyle, de la Univerisdad de Cambridge. La teoría se desarrolló después en un artículo fundamental, publicado en 1957 por E. Margaret Burbidge, Geoffrey R. Burbidge y William A. Fowler, todos del Caltech (Instituto de Tecnología de California), y el propio Hoyle. Proponían allí que, cuando una estrella de gran masa llegaba al fin de su vida, el núcleo estelar se comprimía bajo la fuerza de su propia gravitación. La energía liberada en el colapso expelía la mayor parte de la masa de la estrella, distribuyendo los elementos químicos formados en el curso de su evolución por todo el espacio interestelar. El núcleo contraído dejaba tras de sí un denso residuo, en muchos casos una estrella de neutrones.

La supernova es resultado, infrecuente y espectacular, de la sucesión de reacciones de fusión nuclear que jalonan la historia de la vida de una estrella. El calor desprendido por la fusión crea una presión; ésta contrarresta la atracción gravitatoria que, en otro caso, provocaría el colapso de la estrella. La primera serie de reacciones de fusión producen el efecto neto de soldar cuatro átomos de hidrógeno en un solo átomo de helio. El proceso rinde energía: la masa del átomo de helio es ligeramente inferior a las masas combinadas de los cuatro átomos de hidrógeno, con lo que la energía equivalente al exceso de masa se desprende en forma de calor.

El proceso continúa en el núcleo de la estrella hasta que se agota el hidrógeno allí existente. El núcleo se contrae entonces, puesto que la gravitación ya no está contrarrestada por la producción de energía; en virtud de ello, núcleo y materia circundante se calientan. La fusión del hidrógeno comienza entonces en las capas circundantes. Mientras tanto, el núcleo se ha calentado lo suficiente e inicia otras reacciones de fusión: consume helio para formar carbono, carbono para constituir neón, oxígeno y, finalmente, silicio. De nuevo, cada una de esas reacciones



1. EL COLAPSO Y LA DISTENSION son los sucesos que desencadenan la explosión de una supernova. Aquí se muestra el núcleo de una estrella de gran masa a su paso por el momento de "máximo quebranto", cuando la parte central alcanza su mayor densidad. Cada superficie representa una capa de materia cuya posición radial se ha seguido a lo largo de un período de 12 milisegundos. La masa incluida, esto es, la masa total comprendida dentro de la superficie, no cambia cuando la capa se contrae o se expande. Inicialmente, el núcleo es de hierro, pero la extrema compresión del colapso convierte los kilómetros más internos en materia nuclear; es decir, constituye los núcleos atómicos. Una capa formada de varios núcleos pesados, hierro incluido, ciñe esa región. En el máximo quebranto, la contracción se detiene de golpe, dando origen a una onda de choque (*línea azul*) que se propaga hacia fuera a 30.000 kilómetros por segundo, si no más. En la estela de esa onda de choque, los núcleos se rompen en nucleones (protones y neutrones) individuales.

conduce a una liberación de energía. Un último ciclo de fusión combina los núcleos de silicio para formar hierro, concretamente el isótopo corriente del hierro ^{56}Fe, constituido por 26 protones y 30 neutrones. El hierro es el final de la línea de la fusión espontánea. El núcleo de ^{56}Fe es el más fuertemente ligado de todos. La fusión ulterior absorbería energía en lugar de liberarla.

En esta fase de su existencia, la estrella adquiere una estructura bulbiforme. Una capa de silicio y azufre rodea el núcleo de hierro y elementos semejantes; tras ella hay otras capas de oxígeno, carbono y helio. La más externa de todas está constituida principalmente por hidrógeno.

Sólo las mayores de las estrellas alcanzan la fase final, con núcleo de hierro, de su secuencia evolutiva. Una estrella de tamaño solar no llega más allá de la combustión de helio, mientras que las estrellas menores se detendrán en la fusión del hidrógeno. La estrella grande consume también su provisión de combustible mucho antes, aun cuando hubiera más al principio; pero, por ser la presión y temperatura internas más altas en una estrella así, el combustible se consume antes. Si el Sol vive 10.000 millones de años, una estrella cuya masa lo supere 10 veces cerrará su evolución 1000 veces antes. Con independencia de lo que se tarde en ello, la provisión de combustible aprovechable en el núcleo acabará agotándose. En este punto, la producción de calor en el núcleo toca a su fin y la estrella debe contraerse.

Cuando termina la fusión en una estrella pequeña, se contrae lentamente, convirtiéndose en una enana blanca: una estrella consumida que emite sólo un débil resplandor de radiación. Si está aislada, la enana blanca permanece en este estado indefinidamente, enfriándose de un modo gradual, aunque experimentando pocos cambios. ¿Qué es lo que impide que la estrella se contraiga más? La respuesta la dio, hace más de 50 años, Subrahmanyan Chandrasekhar, de la Universidad de Chicago.

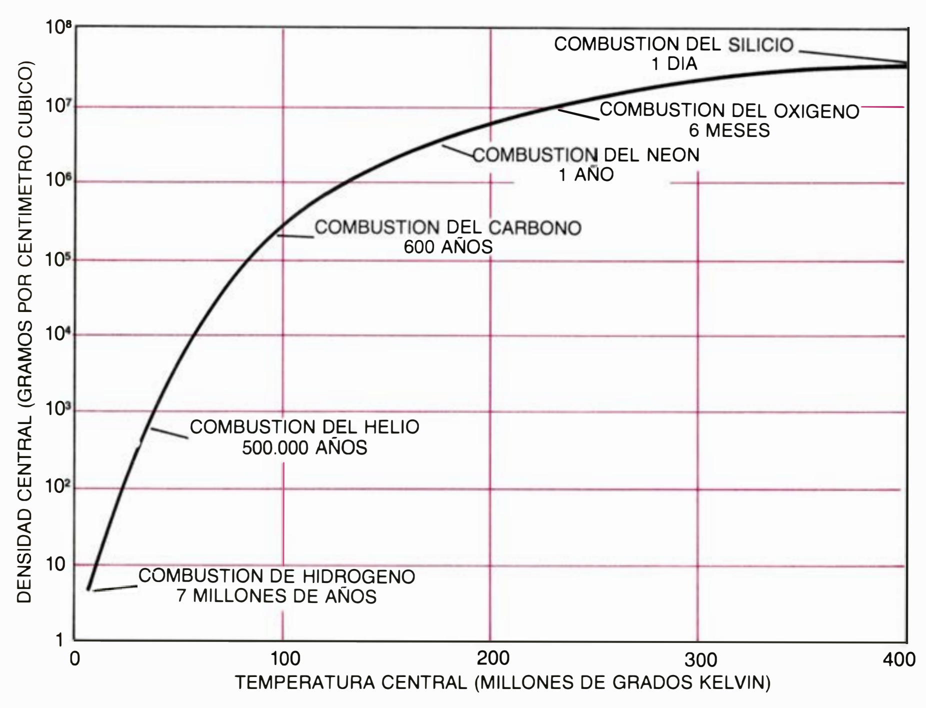
Sin entrar en detalles, cuando la materia ordinaria se comprime, se logra una densidad mayor estrechando los espacios vacíos entre los átomos. En el núcleo de una enana blanca, este proceso ha llegado a su límite: los electrones atómicos se hallan fuertemente comprimidos contra otros. Bajo estas condiciones, los electrones oponen resistencia a toda compresión ulterior.

Chandrasekhar demostró que existía un límite para la presión que la repulsión mutua de los electrones podía resistir. A medida que la estrella se contrae, la energía gravitatoria aumenta, pero también lo hace la energía de los electrones, elevando la presión. Si la contracción llega suficientemente lejos, tanto la energía gravitatoria como la energía de los electrones se hacen inversamente proporcionales al radio de la estrella. Que exista o no algún radio para el cual las dos fuerzas se equilibren dependerá de la masa de la estrella. El equilibrio sólo es posible con una masa inferior a cierto valor crítico, conocido por masa de Chandrasekhar, en su honor. Si la masa supera el límite de Chandrasekhar, la estrella colapsará.

El valor de la masa de Chandrasekhar depende de los números relativos de electrones y nucleones (protones y neutrones considerados en su conjunto): cuanto mayor sea la proporción de electrones, tanto mayor será la presión electrónica y, por ende, mayor la masa de Chandrasekhar. En las estrellas pequeñas, donde la cadena de reacciones de fusión se detiene en el carbono, la relación viene a ser de 1/2, y la masa de Chandrasekhar de 1,44 masas solares. Esta es la máxima masa estable para una enana blanca.

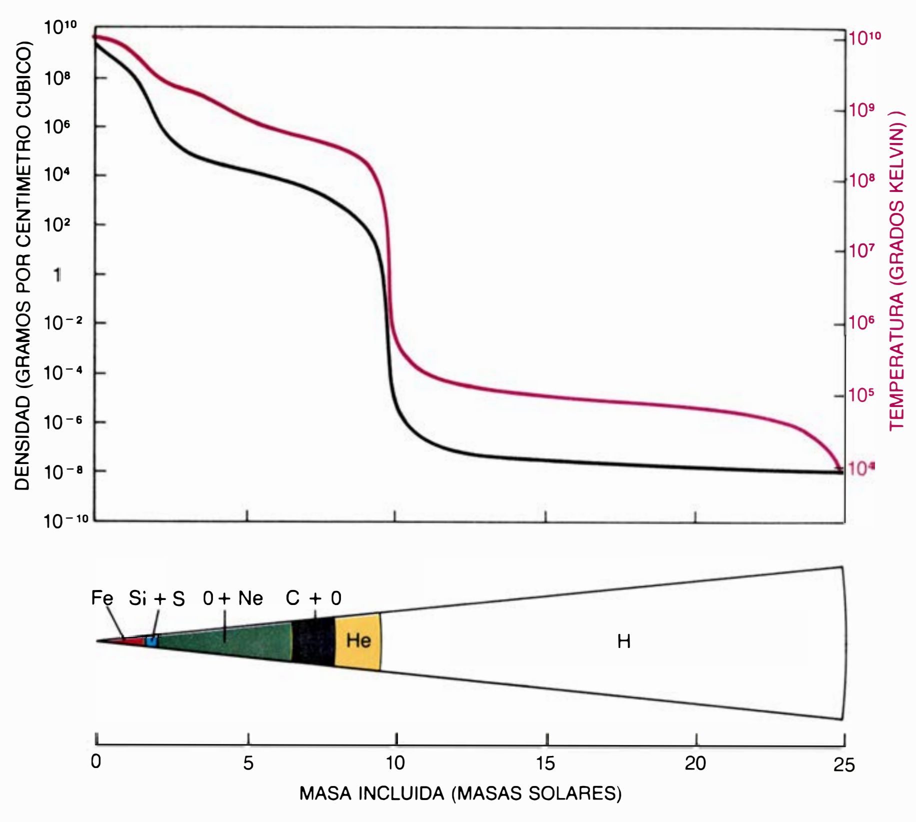
Una enana blanca que tenga una masa inferior al límite de Chandrasekhar puede permanecer estable indefinidamente; sin embargo, éstas son las estrellas que se cree originan las supernovas del tipo I. ¿Cómo puede suceder esto? La clave de la explicación reside en que las enanas blancas que explotan en forma de supernovas no son estrellas solitarias, sino individuos de sistemas binarios. Según cierta hipótesis, el intenso campo gravitatorio de la enana blanca atrae materia de la compañera binaria, la cual cae gradualmente sobre la superficie de aquélla, aumentando la masa del núcleo de carbono y oxígeno. Con el tiempo, el carbono se enciende en el centro y se consume en una onda que se propaga hacia fuera, destruyendo la estrella.

La idea de que la combustión explosiva del carbono desencadenaba las supernovas de clase I fue propuesta en 1960 por Hoyle y Fowler. Desde entonces, muchos astrofísicos han elaborado modelos más detallados, en particular Icko Iben, Jr., y sus colaboradores de la Universidad de Illinois en Urbana-Champaign. Cálculos recientes realizados por Ken'ichi Nomoto y sus colegas de la Universidad de Tokyo sugieren que la combustión no es, en realidad, explosiva. La onda de reacciones de fusión se propagaría como la combustión de una mecha, no como la explosión de un petardo; trataríase de una deflagración, no de una detonación.



2. EVOLUCION DE UNA ESTRELLA DE GRAN MASA en un proceso que se acelera continuamente hacia mayor temperatura y densidad del núcleo. Durante la mayor parte de la vida de la estrella, la fuente primaria de energía es la fusión de núcleos de hidrógeno para formar helio. Cuando se agota el hidrógeno que hay en el núcleo, éste se contrae, calentándose, e inicia la fusión de helio para producir carbono. El ciclo se repite después, a un paso continuamente más rápido, por medio de la combustión de carbono, neón, oxígeno y silicio. La fase final de fusión del silicio da un núcleo de hierro, del que no se puede ya extraer más energía por reacciones nucleares. De aquí que el núcleo de hierro no pueda resistir el colapso gravitatorio, dando lugar a una explosión de supernova. La secuencia que se representa corresponde a una estrella de 25 masas solares. Los datos de esta ilustración, como los de la figura siguiente, se han basado en cálculos realizados por Thomas A. Weaver, del Laboratorio Lawrence Livermore.

Aun cuando la combustión es menos violenta que una detonación, la enana blanca queda completamente destruida. La energía de enlace inicial que mantiene unida la estrella es de unos 10^{50} erg; la energía liberada por la combustión es 20 veces mayor (2×10^{51} ergs), suficiente para explicar la velocidad de 10.000 kilómetros por segundo de los restos de la supernova. En el curso de la deflagración, las reacciones nucleares crean aproximadamente una masa solar del isótopo inestable del níquel ^{56}Ni, que se desintegra dando ^{56}Co y, después, ^{56}Fe a lo largo de un período de meses. La velocidad de liberación de energía en la desintegración radiactiva es la idónea para dar cuenta de la emisión de luz gradualmente decreciente del tipo I de supernovas.



3. ESTRUCTURA DE CEBOLLA, característica de una estrella de gran masa al final de su evolución, inmediatamente antes del colapso gravitatorio. El núcleo de hierro queda inmerso en una capa envolvente de silicio, azufre, oxígeno, neón, carbono y helio, rodeado de una tenue envoltura de hidrógeno. La temperatura y la densidad decrecen continuamente en la capa envolvente, para caer de forma brusca en la envoltura de hidrógeno. La fusión se ha detenido en el núcleo, pero sigue en las fronteras entre capas.

Las supernovas de tipo II se producen en estrellas de masa mucho mayor. Se cree que el límite inferior es de unas ocho masas solares. Para investigar la historia de una supernova del tipo II, lo mejor es comenzar en el momento en que se posibilita la fusión de núcleos de silicio para formar hierro en el centro de la estrella. En este punto, la estrella ya ha pasado por las fases de combustión de hidrógeno, helio, neón, carbono y oxígeno; tiene la estructura de cebolla antes descrita. La estrella ha tardado varios millones de años en alcanzar esa fase. Los sucesos subsiguientes ocurren con mucha mayor rapidez.

Cuando se inicia la reacción de fusión final, empieza a formarse en el centro de la estrella un núcleo constituido por hierro y otros elementos relacionados con éste, dentro de una capa de silicio. La fusión continúa en la superficie de separación entre el núcleo de hierro y la capa de silicio, añadiendo continuamente masa al núcleo. En el interior de éste, sin embargo, ya no hay producción de energía por reacciones nucleares; el núcleo es una esfera inerte, sometida a gran presión. Se encuentra así en la misma situación que la enana blanca: resistirá la contracción gracias a la presión electrónica, restringida por el límite de Chandrasekhar.

Una vez comenzada, la fusión de núcleos de silicio prosigue a una velocidad vertiginosa, con lo que la masa del interior del núcleo alcanza el límite de Chandrasekhar en un día aproximadamente. Indicamos antes que, para una enana blanca, la masa de Chandrasekhar era igual a 1,44 masas solares; para el núcleo de hierro de una estrella grande, el valor puede diferir algo, pero se halla probablemente en el intervalo entre 1,2 y 1,5 masas solares.

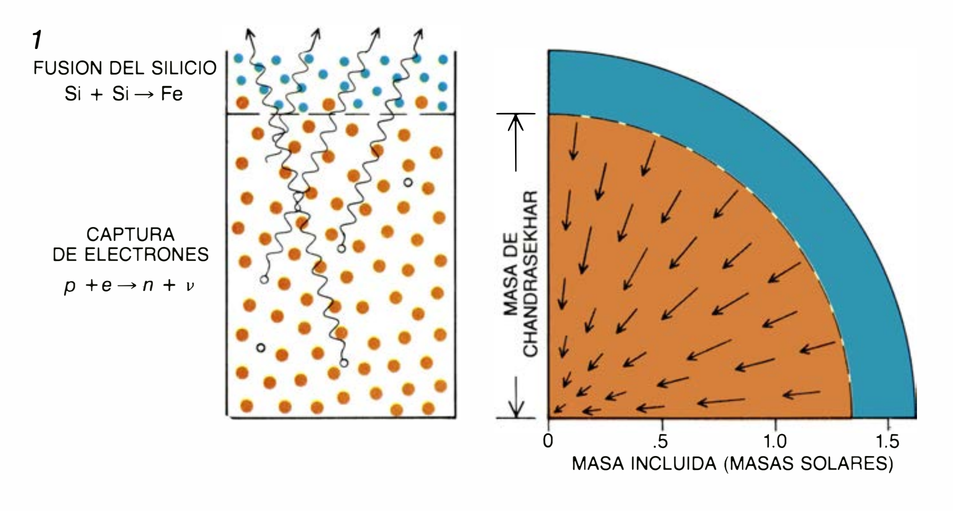
Alcanzada la masa de Chandrasekhar, el paso se hace todavía más rápido. El núcleo que se edificó en un día se derrumba en menos de un segundo. La tarea de análisis se torna también más difícil en este punto, y así la teoría se ve obligada a realizar simulaciones en el ordenador. Se han elaborado programas que siguen la evolución de una estrella; en este sentido destacaría el trabajo realizado por W. David Arnett, de la Universidad de Chicago, y un grupo del Laboratorio Nacional Lawrence Livermore dirigido por Thomas A. Weaver, junto con Stanford Woosley, de la Universidad de California en Santa Cruz. Ellos son los "incendiarios" de estrellas; nosotros y nuestros colegas teóricos, los "usuarios" de sus cálculos.

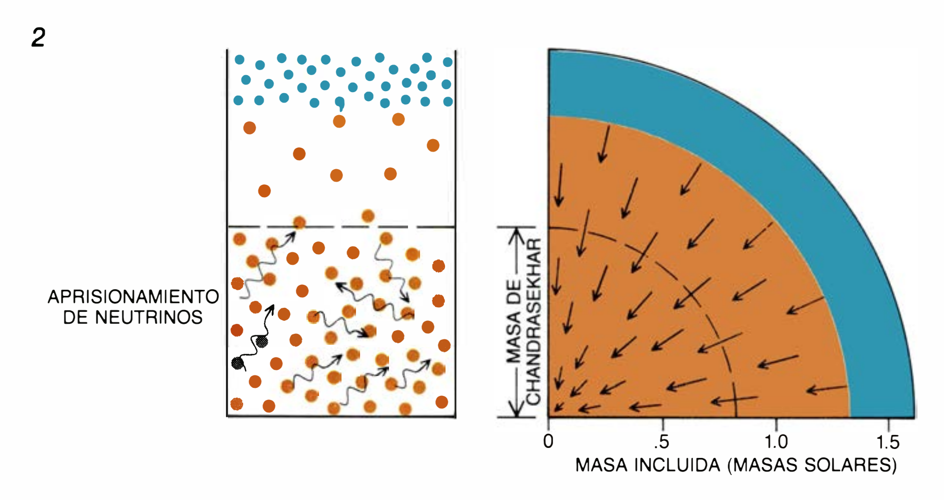
Las simulaciones nos proporcionan un perfil del núcleo de la supernova; dan la composición, la densidad y la temperatura en función del radio. El análisis subsiguiente se apoya en la aplicación de conocidos principios de termodinámica, los mismos que describen fenómenos terrestres comunes, como el funcionamiento de una máquina de vapor o la circulación de la atmósfera.

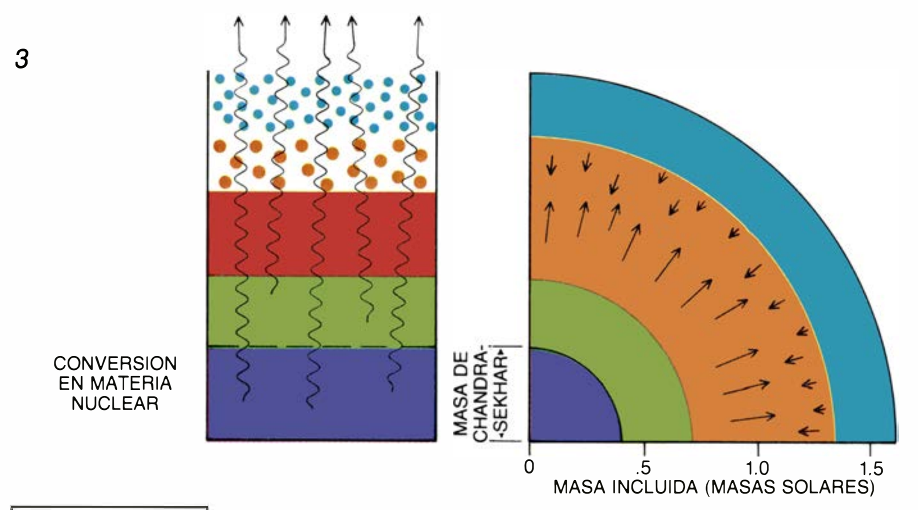
Vale la pena seguir con algún detalle las fases iniciales de la implosión del núcleo. Uno de los primeros puntos a observar es el de la compresión, que eleva la temperatura del núcleo, con lo que podría esperarse que la presión creciese y retardase el colapso. La verdad es que el calentamiento produce el efecto contrario.

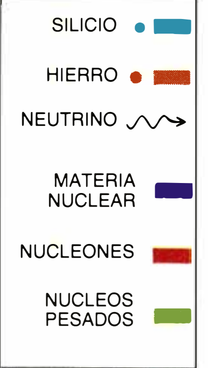
La presión queda determinada por dos factores: el número de partículas de un sistema y su energía media. En la parte central de la estrella, núcleos atómicos y electrones contribuyen a la presión, aunque la aportación de los segundos es mucho mayor. Cuando la parte central de la estrella se calienta, una pequeña fracción de los núcleos de hierro se rompe en núcleos más pequeños, aumentando el número de partículas nucleares y elevando la contribución de los núcleos atómicos a la presión. Pero al propio tiempo la disociación de los núcleos atómicos absorbe energía. Por liberarse energía en la formación de un núcleo de hierro, debe suministrarse la misma cantidad de energía para romper dicho núcleo. La energía, que procede de los electrones, alivia la presión que ejercen éstos. La pérdida de presión electrónica es más importante que la ganancia de presión nuclear. El resultado neto es la aceleración del colapso.

Contra lo que pudiera parecer, la implosión de una estrella no es ningún









4. COMIENZA EL COLAPSO DEL NUCLEO ESTELAR cuando el valor de la masa de hierro sobrepasa el de la masa de Chandrasekhar, situada entre 1,2 y 1,5 veces la solar. En este punto, la presión de los electrones no puede ya resistir la contracción gravitatoria. Al principio del colapso (*1*), el movimiento hacia dentro se acelera con la captura de electrones, que convierte un protón y un electrón en un neutrón y un neutrino. La pérdida del electrón reduce la presión electrónica y, consiguientemente, la masa de Chandrasekhar. Cuando la densidad llega a 4 × 10¹¹ gramos por centímetro cúbico, la materia se torna opaca a los neutrinos (*2*), los cuales quedan, por tanto, aprisionados en el núcleo. En esta fase, la masa de Chandrasekhar es inferior a una masa solar, y su significado también ha cambiado: ahora es la máxima masa que puede colapsar homogéneamente, como un todo unitario. Terminado el colapso (*3*), la parte central del núcleo homogéneo se ha convertido en materia nuclear. Esta se ha comprimido más allá de su densidad de equilibrio, por lo que se distiende lanzando una potente onda de choque. A medida que ésta se propaga a través del núcleo externo, los núcleos de hierro se "evaporan".

proceso caótico, sino ordenado; hasta el extremo de que la evolución entera de una estrella tiende a un estado de mayor orden, de menor entropía. Es fácil ver por qué. En una estrella de hidrógeno, cada nucleón se mueve, de grado o por fuerza, a lo largo de su propia trayectoria; ahora bien, con la parte central de hierro, los átomos son de 56 nucleones ligados entre sí y han de moverse al unísono. Inicialmente, la entropía por nucleón, expresada en unidades de la constante de Boltzmann, se acerca a 15; en el núcleo de la presupernova no llega a 1. La diferencia de entropía se ha ido, durante la evolución estelar, con la radiación electromagnética y, hacia el final, con los neutrinos.

La baja entropía de la parte central se mantiene durante todo el colapso. Las reacciones nucleares cambian continuamente las especies de núcleos atómicos presentes, lo que podría pensarse habría de conducir a un aumento de entropía. Pero las reacciones se desarrollan con tal rapidez que el equilibrio se mantiene siempre. El colapso dura sólo milisegundos, pero la escala de tiempo de las reacciones nucleares es de 10^{-15} a 10^{-23} segundos, de modo que cualquier desviación con respecto al equilibrio se corrige de inmediato.

Hay otro efecto, del que se pensó que aumentaba la entropía; lo probable, sin embargo, es que la reduzca. La alta densidad del núcleo estelar en colapso favorece la reacción conocida por captura de electrones. En este proceso, un protón y un electrón se unen para dar un neutrón y un neutrino. El neutrino se escapa de la estrella, llevándose consigo energía y entropía, enfriando el sistema, igual que la evaporación de agua enfría el cuerpo sobre el que se evapora. Este proceso sufre varias complicaciones que nos impiden saber cuál sea su efecto sobre la entropía. En cualquier caso, la pérdida del electrón elimina su parte proporcional en la presión y facilita la aceleración de la implosión.

La primera fase del colapso de una supernova llega a su fin cuando la densidad del núcleo estelar alcanza un valor de unos 4×10^{11} gramos por centímetro cúbico. Esta no es, en modo alguno, la densidad máxima, puesto que el núcleo continúa contrayéndose, pero marca un cambio crucial en las propiedades físicas: a esta densidad, la materia se hace opaca a los neutrinos. La importancia de este suceso fue puesta de manifiesto por T. J. Mazurek, del Laboratorio de Investigación de la Misión en Santa Bárbara, y por Katsushiko Sato, de la Universidad de Tokyo.

El neutrino es una partícula reservada que rara vez interactúa con otras formas de materia. La mayoría de los neutrinos que inciden sobre la Tierra, por ejemplo, la atraviesan sin chocar ni una sola vez con otra partícula. Sin embargo, cuando la densidad excede los 400.000 millones de gramos por centímetro cúbico, las partículas constituyentes se hallan tan estrechamente apretadas que es probable que hasta un neutrino colisione con alguna. En virtud de lo cual, los neutrinos emitidos en el núcleo colapsante quedan aprisionados allí. El encierro no es permanente; una vez dispersado, absorbido y reemitido reiteradamente, el neutrino escapará tarde o temprano, pero el proceso es más largo que la duración de las fases restantes del colapso. El aprisionamiento eficaz de los neutrinos significa que no hay energía que pueda salir del núcleo estelar.

El proceso de captura de electrones en la fase temprana del colapso no sólo alivia la presión electrónica, sino que también acorta la proporción de electrones a nucleones, cociente que figura en el cálculo de la masa de Chandrasekhar. En un típico núcleo estelar de presupernova, la relación está entre 0,42 y 0,46; en la fase de aprisionamiento de neutrinos, ha caído a 0,39. Esta relación más baja conduce a una masa de Chandrasekhar de 0,88 masas solares, apreciablemente menor que los valores iniciales, entre 1,2 y 1,5.

En este punto, la función de la masa de Chandrasekhar en el análisis de la supernova cambia también. Al comienzo, era la mayor masa capaz de mantenerse por la presión de los electrones; ahora se convierte en la mayor masa que puede colapsar en bloque. Las distintas regiones de esta parte del núcleo pueden comunicarse entre sí mediante ondas sonoras y de presión, de modo que cualquier variación de densidad se iguala inmediatamente. En virtud de lo cual la parte interna del núcleo estelar colapsa de manera homogénea, toda de una pieza, manteniendo su forma.

La teoría del colapso homogéneo fue avanzada por Peter Goldreich y Steven Weber, del Caltech, y ulteriormente desarrollada por Amos Yahil y James M. Lattimer, de la Universidad del estado de Nueva York en Stony Brook. La onda de choque que expulsa las capas exteriores de la estrella se forma en el borde del núcleo homogéneo. Sin embargo, antes de dar una explicación de ese proceso, debemos continuar reseñando la secuencia de sucesos en el propio núcleo.

El trabajo de Chandrasekhar mostró que la presión de los electrones no puede salvar del colapso al núcleo de una estrella grande. La única forma de detener la contracción sería apelar a la resistencia de los nucleones a la compresión. En el núcleo de la presupernova, la presión de los nucleones es una fracción despreciable en comparación con la que ejercen los electrones. Incluso para una densidad de 4×10^{11} gramos por centímetro cúbico, cuando comienzan a quedar aprisionados los neutrinos, la presión de los nucleones es insignificante. La razón estriba en la baja entropía del sistema. A una temperatura dada, la presión es proporcional al número de partículas por unidad de volumen, con independencia del tamaño de las partículas integrantes. Un núcleo de hierro, con 56 nucleones, aporta la misma contribución a la presión que un protón aislado. Si se rompiesen los núcleos atómicos de la parte central de la estrella, la presión podría bastar para detener la contracción. Pero no cabe la escisión de los núcleos por ser la entropía demasiado baja. Un núcleo de supernova que estuviera constituido por protones y neutrones que se movieran de una forma independiente tendría una entropía por nucleón entre 5 y 8 unidades, mientras que la entropía real es inferior a 1.

La situación no cambia, y el colapso no sufre impedimento, hasta que la densidad de la parte central del núcleo alcanza los $2,7 \times 10^{14}$ gramos por centímetro cúbico. Se trata de la densidad de materia en el interior de un núcleo atómico grande; en efecto, los nucleones de la parte central de la estrella se juntan para engendrar un núcleo atómico único y gigante. Una cucharadita de esa materia vendría a tener la masa de todos los edificios de Manhattan juntos.

La materia nuclear es incompresible en sumo grado. De aquí que, una vez que la parte central de la estrella alcance la densidad nuclear, exista una potente resistencia a cualquier compresión ulterior. Esta resistencia constituye la fuente primaria de las ondas de choque que convierten el colapso estelar en una espectacular explosión.

Dentro de la parte en colapso homogéneo del núcleo estelar, la velocidad de la materia que cae hacia el interior es directamente proporcional a su distancia del centro. Precisamente esta propiedad determina que el colapso sea homogéneo. La densidad, por otra parte, decrece con la distancia al centro y, consiguientemente, lo hace también la velocidad del sonido. El radio al que la velocidad del sonido iguala la velocidad de caída hacia dentro se llama punto sónico, e indica el borde del núcleo homogéneo. Una perturbación en su interior no puede ejercer influencia más allá de este radio. En el punto sónico, las ondas sonoras se mueven hacia fuera a la velocidad del sonido medida en el sistema de coordenadas solidario de la materia en caída hacia el interior. Ahora bien, esta materia corre hacia el interior a la misma velocidad; por tanto, las ondas estarán en reposo con respecto al centro de la estrella.

Cuando la parte central del núcleo estelar alcanza la densidad nuclear, el colapso se detiene de golpe. Esto da origen a ondas sonoras que se propagan hacia fuera a través del medio que constituye el núcleo estelar, a imagen de las vibraciones del mango de un martillo cuando golpea el yunque. Las ondas se retardan a medida que salen hacia fuera, a través del núcleo homogéneo, y ello porque la velocidad local del sonido disminuye y porque se propagan corriente arriba en contra de un movimiento de materia que se hace cada vez más rápido. En el punto sónico se detienen completamente. Mientras tanto, nueva materia está cayendo sobre la dura esfera de materia nuclear en el centro, generando más ondas. En fracción de milisegundo, las ondas se reúnen en el punto sónico, aumentando allí la presión. El salto de presión retarda la materia que cae a través del punto sónico y crea una discontinuidad en la velocidad. Tal variación discontinua constituye una onda de choque.

En la superficie de la esfera dura de la parte central de la estrella, la materia que cae se detiene, aunque no instantáneamente. La compresibilidad de la materia nuclear es baja, pero no nula; así, la cantidad de movimiento lleva el colapso más allá del punto de equilibrio, comprimiendo el núcleo central de la estrella hasta una densidad superior incluso a la del núcleo atómico. Llamamos a este punto el instante de "máximo quebranto". La mayoría de las simulaciones con ordenador sugieren que la máxima densidad alcanzada viene a ser el 50 por ciento mayor que la densidad de equilibrio de un núcleo. Después del máximo quebranto, la esfera de materia nuclear se recobra, cual si se tratara de una pelota de goma que hubiéramos comprimido. La recuperación desencadena más ondas sonoras, que se unen a la creciente onda de choque en el punto sónico.

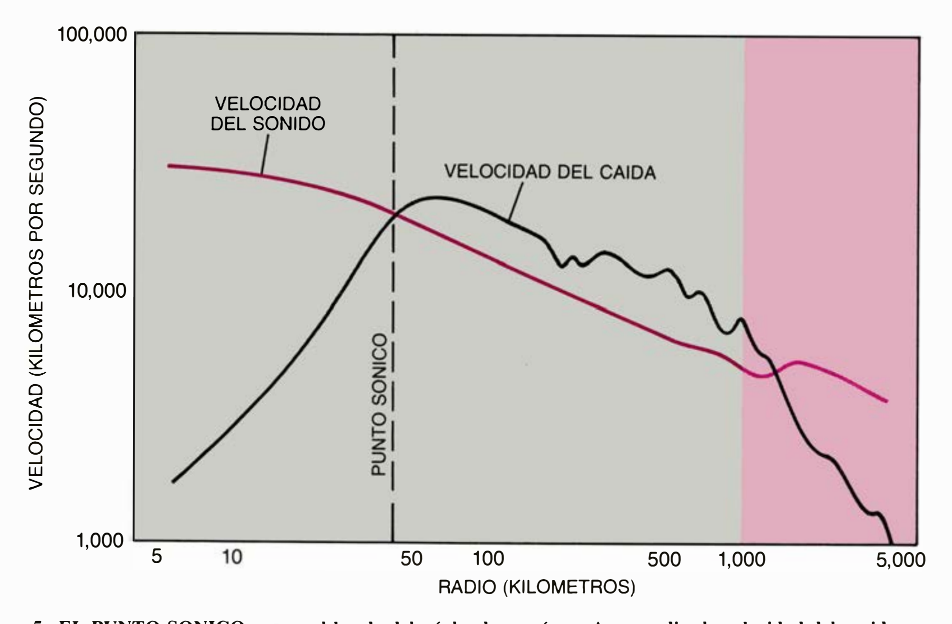
Una onda de choque difiere de otra sonora en dos aspectos. Primero, la sonora no produce cambios permanentes en el medio donde se propaga: pasada

la onda, la materia recupera su estado anterior. El paso de una onda de choque induce grandes modificaciones en la densidad, la presión y la entropía. Segundo, la onda sonora se mueve –por definición– a la velocidad del sonido; la de choque lo hace más deprisa, a una velocidad determinada por la energía de la onda. De aquí que, una vez que la discontinuidad de presión en el punto sónico ha crecido hasta convertirse en una onda de choque, no queda fijada ya en su lugar por la materia que cae. La onda puede continuar avanzando hacia fuera, a través de los estratos superpuestos de la estrella. Según las simulaciones de ordenador, así lo hace, con gran velocidad, entre 30.000 y 50.000 kilómetros por segundo.

Hasta esta fase de la evolución de la supernova, todos los cálculos concuerdan básicamente. Pero no podemos decir lo mismo de lo que sucede a continuación. En la más sencilla de las hipótesis, de la que los autores son partidarios, la onda de choque corre velozmente hacia fuera, llegando a la superficie del núcleo de hierro en una fracción de segundo, y continuando después a través de las sucesivas capas de la estructura bulbiforme de la estrella. Después de algunos días, alcanza la superficie y hace erupción en forma de violenta explosión. Más allá de cierto radio –el punto de bifurcación– toda la materia de la estrella se expulsa hacia fuera. Lo que queda dentro del radio de bifurcación se condensa en una estrella de neutrones.

Para nuestro infortunio, los cálculos del destino de la onda de choque a partir de núcleos de supernova simulados en 1974 por Weaver y Woosley no concuerdan con el esquema. La onda se propaga hacia fuera hasta una distancia de entre 100 y 200 kilómetros del centro de la estrella, pero entonces se atasca, y permanece más o menos en la misma posición mientras que continúa cayendo materia a través de ella. La principal razón para su detención es que la onda de choque rompe los núcleos atómicos en nucleones. Aunque este proceso aumenta el número de partículas, con lo que sería de esperar que la presión aumentara, consume también gran cantidad de energía; el resultado neto es que tanto la temperatura como la presión se reducen notablemente.

La fragmentación de los núcleos contribuye también de otra manera a la disipación de energía: suelta protones libres, que capturarán fácilmente electrones. Los neutrinos emitidos en este proceso pueden escapar, llevándose consigo energía de la estrella. El escape es posible porque el choque ha penetrado hasta materia cuya densidad está por debajo del valor crítico de aprisionamiento de neutrinos. Cuantos de éstos habían quedado aprisionados tras la onda de choque se escapan también, llevándose consigo más energía. Ante las muchas amenazas para la onda de choque en la región entre 100 y 200 kilómetros, los autores han llamado a esta región de la estrella "campo de minas".



5. EL PUNTO SONICO marca el borde del núcleo homogéneo. A ese radio, la velocidad del sonido es igual a la velocidad de caída hacia dentro de la materia. Una onda sonora en el punto sónico corre hacia fuera a la velocidad del sonido respecto a la materia a través de la que pasa; ahora bien, dado que la materia está cayendo hacia dentro a la misma velocidad la onda es estacionaria respecto al centro de la estrella. Como resultado, la perturbación que se produzca dentro del núcleo no puede manifestarse al exterior. La gráfica se basa en cálculos realizados por W. David Arnett, de la Universidad de Chicago.

Sería agradable poder informar que hemos encontrado un mecanismo único, capaz de explicar, en todas las supernovas de tipo II, el modo de propagación de la onda de choque a través del campo minado. Pero no sería cierto. Sí podemos ofrecer un conjunto de explicaciones plausibles, cada una de las cuales parece aplicable a estrellas de un dominio particular de masas.

El dominio donde empezar son las estrellas de entre 12 y 18 masas solares. Los modelos más recientes de núcleos de supernova elaborados por Weaver y Woosley para tales estrellas difieren algo de los que calcularon hace un decenio; la diferencia más importante es que el núcleo de hierro es menor de lo que las estimaciones anteriores indicaban: alrededor de 1,35 masas solares. El núcleo homogéneo, en cuya superficie se forma la onda de choque, engloba 0,8 masas solares de esta materia, dejando 0,55 masas solares de hierro fuera del punto sónico. Por ser la ruptura del núcleo de hierro lo más costoso, en términos energéticos, al reducirse la cantidad de éste, se facilita que la onda de choque salga del núcleo.

Jerry Cooperstein y Edward A. Baron, de Stony Brook, han simulado con éxito explosiones de supernova en ordenador, arrancando de los modelos de núcleos de Weaver y Woosley. El primer requisito, conjeturado por Sidney H. Kahana, del Laboratorio Nacional de Brookhaven, es que el núcleo homogéneo esté muy fuertemente comprimido, para que pueda reaccionar vigorosamente y crear una intensa onda de choque. Dos factores contribuyen a obtener ese resultado en las simulaciones. Primero, el uso de la relatividad general en vez del campo de fuerzas de la gravitación newtoniana. El segundo es la hipótesis de que la materia nuclear es mucho más compresible de lo que se había supuesto.

Los primeros resultados de Baron mostraban que una estrella de 12 masas solares explotaría si la compresibilidad de la materia nuclear superase, en vez y media, el valor corriente. Aunque esto parecía bastante arbitrario, uno de los autores (Brown) examinó luego el problema mediante un complicado método de la teoría de la materia nuclear. Resultó que la interpretación más coherente de los resultados experimentales proporcionaba un compresibilidad de ¡2,5 veces el valor corriente! Nos enteraríamos después que, en 1982, Andrew D. Jackson, E. Krotschek, D. E. Meltzer y R. A. Smith habían llegado a la misma conclusión por otro método, pero nadie había caído en la cuenta de

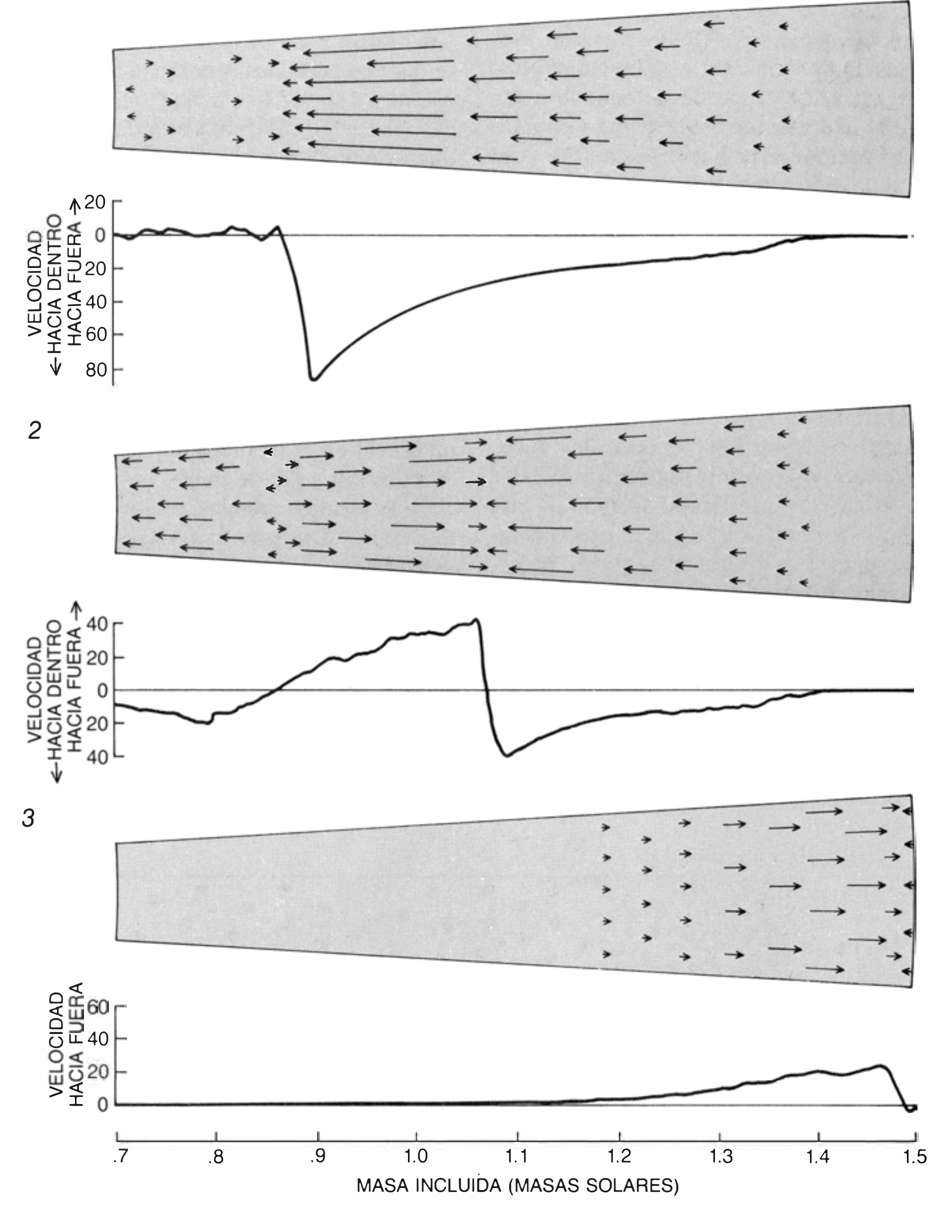
la importancia de su trabajo en relación con el problema de la supernova. Consideramos que el valor nuevo y más alto de la compresibilidad nuclear ofrece bastantes garantías.

El mecanismo descrito por Baron, Cooperstein y Kahana parece ser aplicable a estrellas de hasta 18 masas solares. Sin embargo, con estrellas todavía mayores, hasta la potente onda de choque creada en sus simulaciones veríase frenada en cuanto "pisara" el campo de minas. Una estrella de 25 masas solares tiene unas dos masas solares de hierro en su núcleo; la onda de choque debe penetrar, pues, 1,2 masas solares de hierro en lugar de 0,55. La onda de choque carece de energía para disociar tal cantidad de hierro.

Una explicación plausible de lo que podría ocurrir en esas enormes estrellas parece haberse deducido recientemente del trabajo de James R. Wilson, del Laboratorio Lawrence Livermore, quien ha realizado gran cantidad de simulaciones numéricas de explosiones de supernova. Durante algún tiempo, se había tenido la impresión de que cuando fallaba la onda de choque, toda la masa de la estrella podía caer de nuevo en el núcleo, que evolucionaría hasta transformarse en un agujero negro. Este es todavía uno de sus posibles destinos, pero Wilson observó un nuevo fenómeno cuando continuó con algunas de sus simulaciones durante un período más largo.

En el núcleo de una estrella colapsante, la onda de choque sólo tarda unos 10 milisegundos en llegar al campo de minas y detenerse. La simulación del suceso, incluso con el ordenador más rápido, dura una hora por lo menos. Wilson dejó que sus cálculos continuaran durante un tiempo 100 veces más largo, para simular un segundo de tiempo de la supernova. En casi todos los casos, halló que la onda de choque se regeneraba con el tiempo.

Esta regeneración se debe al calentamiento por neutrinos. El núcleo interior es un copioso emisor de neutrinos porque en él se produce la captura incesante de electrones a medida que la materia se comprime hasta la densidad nuclear. Adam S. Burrows y Latimer, de Stony Brook, y Mazurek han mostrado que la mitad de los electrones dentro del núcleo homogéneo se capturan en menos de medio segundo, mientras los neutrinos emitidos se llevan consigo aproximadamente la mitad de la energía gravitatoria liberada por el colapso, unos 10^{53} erg. En las profundidades del núcleo, los neutrinos entran en choque frecuente con otras partículas. Se hizo notar más arriba que están aprisionados, en el sentido de que no pueden escapar durante el tiempo necesario para el colapso homogéneo. Pero con el tiempo, los neutrinos se filtran hacia arriba y alcanzan estratos de menor densidad, donde pueden moverse libremente.



6. LA ONDA DE CHOQUE puede moverse más deprisa que el sonido y, por tanto, transportar la energía y cantidad de movimiento de la distensión allende el punto sónico. Inmediatamente antes de la distensión (*1*), el núcleo interno ha alcanzado la densidad de la materia nuclear y ha cesado su contracción, pero la materia que lo rodea está a punto de caer sobre él a velocidades de hasta 90.000 kilómetros por segundo. Dos milisegundos más tarde (*2*), el núcleo ha sido empujado todavía más hacia dentro, pero al mismo tiempo mucha de la materia que caía ha rebotado, provocando la onda de choque. Después de 20 milisegundos (*3*), la onda de choque ha llegado al borde del núcleo. Este mecanismo de explosión de supernova, en el que la onda de choque logra irrumpir fuera del núcleo, parece aplicable a estrellas de entre 12 y 18 masas solares. Los perfiles de velocidad que se representan aquí fueron calculados por Jerry Cooperstein, de Nueva York. Las velocidades se ofrecen en miles de kilómetros por segundo.

En el radio donde la onda de choque queda frenada, sólo un neutrino de cada mil tiene cierta probabilidad de chocar con una partícula de materia; ahora bien, esos choques aportan una importante cantidad de energía. La mayor parte de ésta se consume en la disociación de núcleos en nucleones, proceso éste que produce el estacionamiento de la onda de choque. Mas la energía de los neutrinos calienta la materia y, por tanto, eleva fuertemente la presión. Hemos llamado a este período, en el que la onda de choque se detiene y se regenera después en virtud del calentamiento provocado por los neutrinos, "la pausa de descanso".

El calentamiento por neutrinos presenta su máxima eficacia a un radio de unos 150 kilómetros, donde la probabilidad de absorción de los mismos no es demasiado baja, ni suficientemente alta la temperatura para que la propia ma-

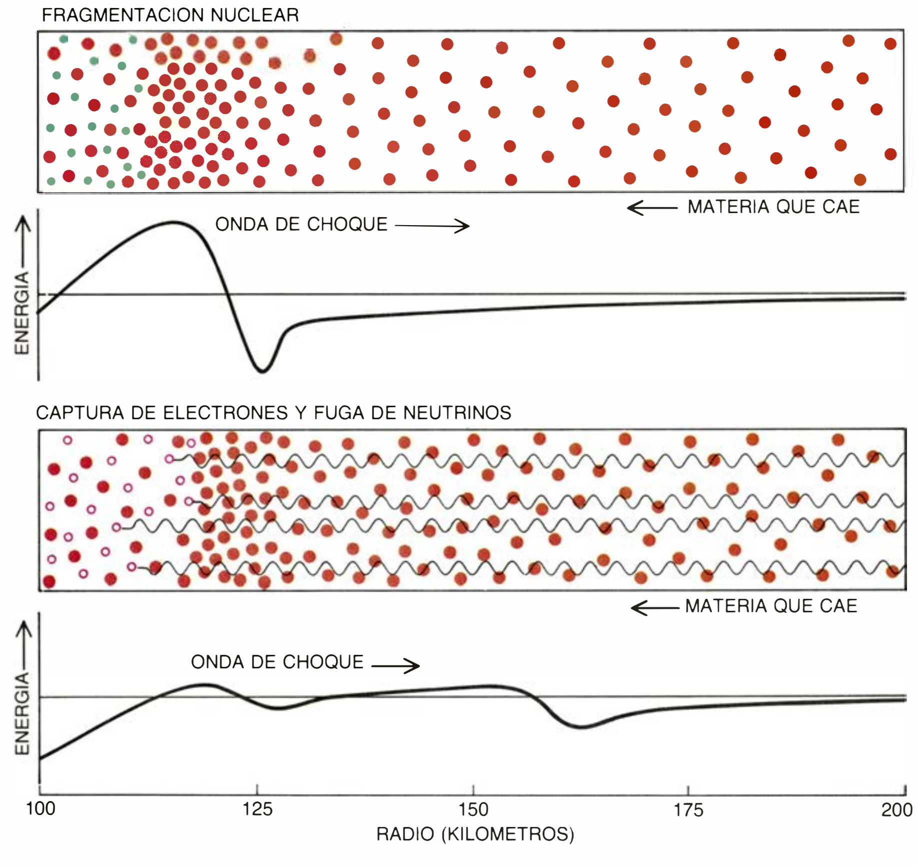
teria se convierta en un apreciable emisor de neutrinos. Medio segundo después la presión en ese radio ha adquirido un valor capaz de detener la caída de la materia que está encima y comenzar a empujarla hacia fuera. De aquí que los 150 kilómetros se conviertan en el radio de bifurcación. La materia encerrada en ese perímetro acaba cayendo en el núcleo; la materia fuera de él, 20 masas solares o más, es expulsada.

Falta por considerar el grupo de estrellas que tienen entre 8 y 11 masas solares. De entre ellas, las capaces de mantener una explosión de supernova del tipo II son las menores. En 1980, Weaver y Woosley sugirieron que las estrellas de este grupo formaban una clase separada, en la que el mecanismo de supernova difería bastante del mecanismo en estrellas más pesadas.

Según cálculos realizados por Nomoto y por Weaver y Woosley, en la fase de presupernova de estas estrellas más ligeras, el núcleo no alcanza la temperatura necesaria para formar hierro; en cambio, la fusión termina con una mezcla de elementos entre el silicio y el oxígeno. La producción de energía se detiene entonces, y como la masa del núcleo es mayor que la de Chandrasekhar, el núcleo colapsa. La onda de choque originada por el colapso puede ver favorecida su propagación por dos circunstancias. En primer lugar, la rotura de núcleos atómicos de oxígeno o de silicio resta a la onda de choque menos energía de la que absorbería la disociación de núcleos de hierro. En segundo lugar, mucho más allá, aunque sin salirse del interior estelar, la densidad cae bruscamente (se divide por unos 10.000 millones) en la frontera entre las capas de carbono y las de helio. La onda de choque avanza mucho mejor cuando tiene que atravesar materia de menor densidad.

Para una estrella de nueve masas solares, Nomoto halló que el núcleo, en la fase de presupernova, estaba constituido por oxígeno, neón y magnesio y tenía una masa de 1,35 masas solares. Nomoto y Wolfgang Hillebrandt, del Instituto Max Planck de Física y Astrofísica de Munich, han proseguido investigando la ulterior evolución de este núcleo. En su opinión, la explosión se propaga fácilmente a través del núcleo, ayudada por la combustión de núcleos de oxígeno, liberando una cantidad de energía bastante grande.

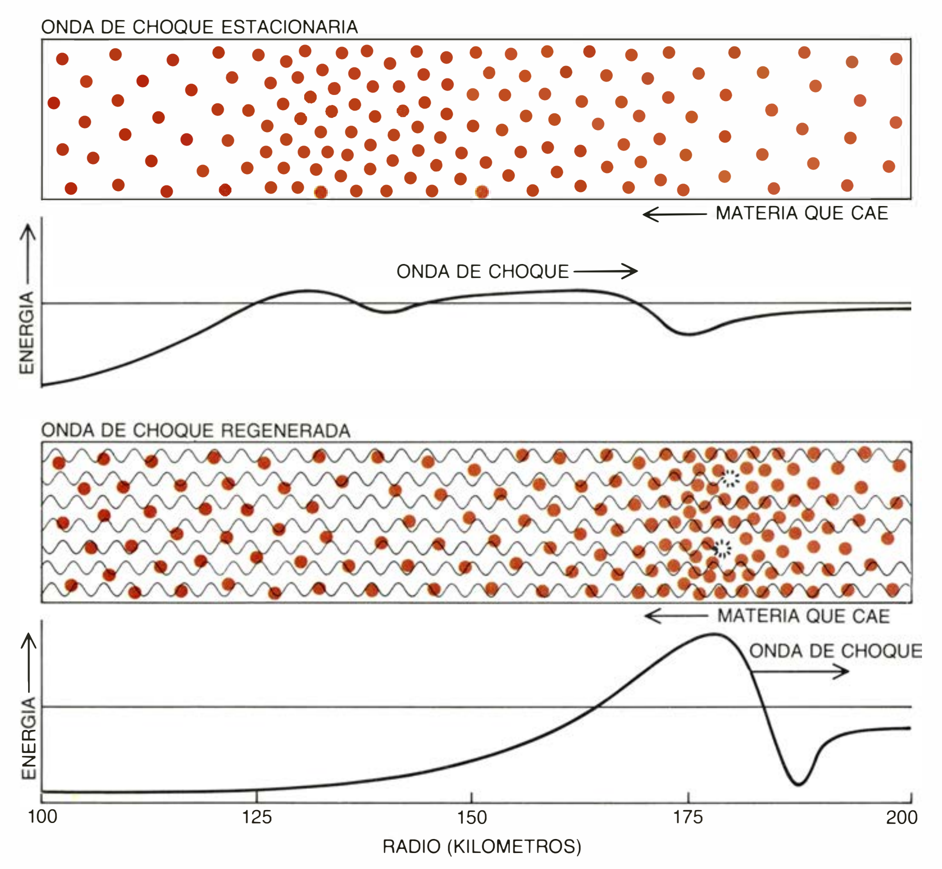
Dos recientes intentos de reproducir los resultados de Nomoto e Hillebrandt han fracasado; no se ve clara, pues, la consistencia de su modelo. Creemos que la mayor compresibilidad de la materia nuclear admitida en el programa de Baron, Cooperstein y Kahana podría servir de algo. Por supuesto, quizás estrellas tan pequeñas no originen supernovas; por otra parte, hay argumentos (basados en medidas de la abundacia de diversas especies nucleares) que sugieren que la Nebulosa del Cangrejo se formó por la explosión de una estrella de unas nueve masas solares.



7. LA ONDA DE CHOQUE PARECE VOLVERSE ESTACIONARIA en estrellas cuya masa sea mayor que unas 18 veces la solar. Varios procesos extraen energía de la onda. El más importante es la fragmentación nuclear: la energía de la onda de choque se disipa rompiendo núcleos de hierro, lo que rebaja la temperatura y presión detrás de la onda. Los protones liberados por la fragmentación se disponen a la captura de electrones, lo que reduce la presión todavía más. Una vez que la onda penetra en una región de densidad inferior a 10^{11} gramos por centímetro cúbico, se va filtrando neutrinos, restando nuevamente energía. En virtud de todo ello, la onda de choque puede retardarse hasta la velocidad de la materia que cae a través de ella y no progresar más. En razón de los diversos peligros para la onda de choque, los autores han bautizado a esta región, situada entre 100 y 200 kilómetros, el "campo de minas".

Después de haberse expulsado las capas exteriores de la estrella, queda por decidir el destino del núcleo. Igual que la gravitación supera la presión electrónica si la masa excede el límite de Chandrasekhar, ni siquiera la materia nuclear resistirá la compresión si la gravitación adquiere suficiente intensidad. Para una estrella de neutrones fría –que no tiene otra fuente de presión compensadora que la repulsión entre nucleones– la masa límite se cree cercana a las 1,8 masas solares. El compacto resto formado por la explosión de estrellas ligeras está por debajo de ese límite, de modo que esas supernovas dejan, presumiblemente, tras sí una estrella de neutrones estable. En el caso de estrellas mayores la cuestión no está decidida. En los cálculos de Wilson, cualquier estrella de más de unas 20 masas solares deja tras sí un resto compacto superior a dos masas solares. Parece que el resto podría convertirse en un agujero negro, una región del espacio donde la materia se ha comprimido hasta densidad infinita.

Aun cuando el resto compacto acabe degenerando finalmente en un agujero negro, comienza en estrella de neutrones caliente. La temperatura central tras la explosión es de unos 100.000 millones de grados Kelvin, lo que genera presión térmica suficiente para mantener la estrella, aunque supere las 1,8 masas solares. La materia nuclear ardiente se enfría por emisión de neutrinos. La energía que se llevan consigo centuplica de lejos la energía emitida en la propia explosión: unos 3×10^{53} erg. Es la energía equivalente al 10 por ciento de la masa de la estrella de neutrones.



8. REGENERACION DE LA ONDA DE CHOQUE DETENIDA en estrellas pesadas; quizá se deba al calentamiento por los neutrinos. Su fuente es el núcleo colapsado, que radia energía equivalente al 10 por ciento de su masa en forma de neutrinos. Sólo una pequeña fracción de los mismos se absorbe, pero el flujo es tan intenso que disocia muchos núcleos de hierro. Al principio de la evolución de la supernova, la rotura de núcleos de hierro tomó energía de la onda de choque; mas, como ahora el proceso está alimentado por neutrinos externos, la disociación ya no disminuye la energía de la onda de choque.

Por medio de la detección de los neutrinos procedentes de una explosión de supernova y del subsiguiente enfriamiento de la estrella de neutrones podríamos hacernos una idea más ajustada de lo que sucede en esos espectaculares acontecimientos. Los neutrinos se originan en el núcleo de la estrella y atraviesan casi incólumes las capas exteriores; portan, pues, información de las condiciones allí reinantes. La radiación electromagnética, por otra parte, se difunde lentamente a través de las capas de materia y revela lo que está sucediendo en la superficie. Desde hace poco hay instalados detectores de neutrinos en minas y túneles, protegidos de la radiación cósmica de fondo.

Otra comprobación experimental sobre la validez de los modelos de supernova se apoya en la abundancia relativa de elementos químicos del universo. Las supernovas constituyen quizá la fuente principal de todos los elementos más pesados que el carbono, de modo que el espectro de elementos liberado en explosiones simuladas debería concordar con las relaciones de abundancia observadas. Muchos intentos por reproducir las relaciones de abundancia han fracasado, pero a principios de este año, Weaver y Woosley completaron cálculos cuya justa concordancia con las observaciones llama la atención. Empezaron con el modelo de Wilson para la explosión de una estrella de 25 masas solares. En lo concerniente a la inmensa mayoría de elementos e isótopos, entre el carbono y el hierro, sus relaciones de abundancia se ajustaban estrechamente a las medidas.

En años recientes, el estudio de las supernovas se ha beneficiado de una estrecha interacción entre la teoría analítica y las simulaciones por ordenador. Las primeras especulaciones acerca de los mecanismos de supernova se propusieron hace decenios, pero no se pudieron realizar en detalle hasta que los ordenadores necesarios para la simulación numérica estuvieron a punto. Los resultados de los cálculos, por otro lado, no se pueden comprender si no es en el contexto de un modelo analítico. Continuando esta colaboración, debería ser posible progresar desde una idea general de los principios y mecanismos hasta la predicción detallada de las observaciones astronómicas.

Ciencia y sociedad

Quesos españoles

Posiblemente fueron los griegos y fenicios los primeros en elaborar queso en la Península Ibérica, pero quienes lo popularizaron y además perfeccionaron su fabricación fueron los romanos. Columela dedica varias páginas a este alimento en *De re rustica*. Se cree que a los quesos conocidos en España en la época romana se sumaron después los visigóticos y más tarde los árabes. Se atribuye a los musulmanes la paternidad del Manchego (*Ma 'ancha* en árabe significa tierra seca). En esta región explotaron abundantes rebaños de ovejas que les proporcionaban, además de la carne para su consumo cotidiano, la leche requerida para fabricar el queso.

La primera noticia escrita en castellano acerca de este alimento corresponde a fray Jimeno, despensero de la comunidad clerical de los santos Justo y Pastor, de Rozuela (León), quien a fines del siglo XI llevaba la contabilidad de los quesos que dicho cenobio había puesto bajo su custodia. Desde entonces abundan en nuestras obras literarias y refranes las referencias a tan excelente manjar. Sirva de ejemplo especial el elogio que Cervantes hace del queso de Tronchón, al describir el encuentro de Sancho con Tosilos, cuando regresa a su aldea acompañando a Don Quijote, vencido por el Caballero de la Blanca Luna.

Según el Anuario de Estadística Agraria del Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación, en 1981 se produjeron en España 117.695 toneladas de queso industrial (excluido el fundido) y 35.369 de queso artesanal. A estas cantidades habría que añadir la producción anual de queso fundido que ronda las 28.000 toneladas. En cuanto a consumo, España ocupa uno de los lugares más bajos de Europa con unos 4,1 kilogramos, por persona y año, que contrastan con los 18,5 de Francia y los 13,8 de Italia, países de raíz latina.

La segunda edición del Catálogo de Quesos Españoles, publicado por el ministerio antes citado (1974), incluye 36 variedades de queso típicamente españoles. A su vez, el Instituto Nacional de Denominaciones de Origen









NOMBRE	CLASE DE LECHE	CARACTERES DISTINTIVOS
I. QUESOS BLANDOS		
BURGOS	DE OVEJA	QUESO FRESCO DE CONSUMO INMEDIATO.
CERVERA	MEZCLA DE OVEJA Y VACA	SE TRATA, COMO EL ANTERIOR, DE QUESO FRESCO DE CONSUMO INMEDIATO.
VILLALON	DE OVEJA	SEMEJANTE AL DE BURGOS; A VECES SE DEJA MADURAR 5-7 SEMANAS.
PASIEGO SIN PRENSAR	DE VACA	FRESCO DE CONSUMO INMEDIATO; MUY USADO EN LA FABRICACION DE QUESADAS.
TETILLA	DE VACA	MADURADO A 7-10 GRADOS C Y UNA HUMEDAD RELATIVA DEL 75 POR CIENTO. MADURACION CON BACTERIAS LACTICAS Y *STR. FAECALIS.*
CAMERANO	DE CABRA	QUESO FRESCO DE PRONTO CONSUMO.
II. QUESOS SEMIDUROS		
GORBEA	DE OVEJA	LIGERAMENTE PRENSADO, SALAZONADO SUPERFICIALMENTE Y MADURADO A 12-15 °C UN MES APROXIMADAMENTE. MADURACION ESPONTANEA LACTICA.
PEDROCHES	DE OVEJA	ELABORADO CON CUAJO VEGETAL. MADURACION LACTICA NATURAL A TEMPERATURA Y HUMEDAD RELATIVA AMBIENTALES DURANTE 1-2 MESES.
CABRALES	DE VACA, ADICIONADA DE OVEJA Y CABRA	COAGULACION CON CUAJO ANIMAL; NO SE PRENSA PERO SE VOLTEA CADA 24 HORAS. MADURACION: 15 DIAS A 12 °C Y DESPUES EN CUEVAS A 7-10 GRADOS C Y HUMEDAD RELATIVA DEL 95 POR CIENTO. SE "PINCHA" E INOCULA CON *P. ROQUEFORTI.*
SAN SIMON	DE VACA	MOLDEADO EN FORMA DE PERA Y AHUMADO. SE SALAZONA AÑADIENDO SAL A LA LECHE ANTES DE COAGULAR; MADURA A 10-15 GRADOS C Y HUMEDAD RELATIVA AMBIENTE; BACTERIAS LACTICAS.

Características de algunos quesos españoles. Cabrales, Roncal y Mahón se hallan acogidos a la denominación

(INDO), dependiente del mismo organismo, en un opúsculo más reciente (1985), eleva este número a 48. Quizá las variedades de quesos españoles sean algunas más; sin embargo, y como ocurre en otros países, la mayoría derivan de unos pocos tipos básicos. Se trata en muchos casos de quesos elaborados esporádicamente en el medio rural mediante un empirismo rutinario y en cantidades mínimas, pero cuyas técnicas de elaboración y sobre todo su fase madurativa debieran conocerse mejor y normalizarse para obtener quesos de características uniformes y constantes.

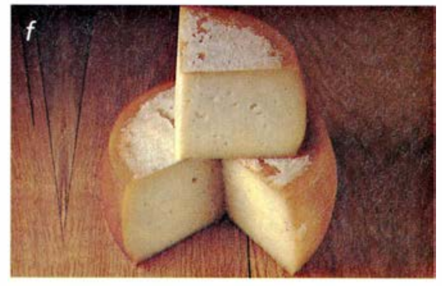
El origen de los nombres de los distintos quesos es muy variado; en su mayor parte proceden de la región, comarca, valle, montaña o localidad en donde se elaboraron originalmente, como Manchego (de la Mancha), Roncal (del valle del mismo nombre), Camerano (de la sierra de Cameros), de Mahón, etcétera. Otros derivan de la forma con que se presentan en el mercado (queso de tetilla, de pata de mulo, etcétera) y no faltan casos en los que el nombre hace referencia a la leche con que se fabricó y al lugar en donde lo fue por primera vez (queso de oveja de Andévalo, de cabra de Cádiz).

La mejor clasificación es la que tiene en cuenta la forma de consumirlos (frescos o madurados), su textura (blandos, semiduros y duros), la leche con que se elaboran (de vaca, de oveja, de cabra y mixtos), su contenido graso (*doble graso* con 60 por ciento o más de grasa en el extracto seco, *extra graso*, con un 45 por ciento como mínimo, *graso* con no menos del 40 por ciento, *semigraso* con 20 por ciento como mínimo y *magro* con menos del 20 por ciento) y los microorganismos que intervienen en su maduración (bacterias, mohos o ambos).

Los quesos blandos, que a la presión dan precisamente sensación de blandura, poseen un gran contenido de agua (más del 40 por ciento) debido a que no se prensaron durante su elaboración y a que su período madurativo fue breve. Se trata generalmente de quesos de sabor suave, poco marcado. Los de Burgos y Villalón son los quesos frescos de este tipo más populares y, los gallegos (Ulloa, Tetilla, Cebrero), los representantes típicos de quesos blandos madurados por bacterias.

El queso de Burgos, como todos los frescos, ha de elaborarse con leche pasterizada. Se fabrica con leche de oveja y cuajo animal; después del desuerado, la cuajada se moldea dándole forma cilíndrica y un tamaño variable (1-2 kilogramos). Carece de corteza y es de pasta blanca y compacta. Debe consumirse pronto (a los 2-3 días de fabricado). El de Villalón, muy parecido al de









NOMBRE	CLASE DE LECHE	CARACTERES DISTINTIVOS
	II. QUESOS SEMIDUROS	
MALAGA	DE CABRA	SE PRENSA LIGERAMENTE. MADURACION LACTICA ESPONTANEA A TEMPERATURA Y HUMEDAD AMBIENTALES UNOS 10 DIAS.
	III. QUESOS DUROS	
SAN BENITO (HUELVA)	DE OVEJA	COAGULACION CON CUAJO VEGETAL; SIN PRENSAR SE MOLDEA; VOLTEO 2-3 VECES AL DIA LOS PRIMEROS TRES DIAS. MADURACION LACTICA ESPONTANEA EN BODEGAS (14-16 GRADOS C). SE CONSERVA IMPREGNANDOLO EXTERNAMENTE DE ACEITE.
IDIAZABAL	DE OVEJA	DESPUES DE MOLDEADO Y SALAZONADO SE AHUMA. MADURA ESPONTANEAMENTE EN CUEVAS NATURALES.
MANCHEGO	DE OVEJA	COAGULACION CON CUAJO ANIMAL; CUAJADA PRENSADA Y SALAZONADA CON SAL SECA O EN SALMUERA. MADURACION LACTICA A 10-12 GRADOS C Y 85 POR CIENTO DE HUMEDAD RELATIVA DOS O MAS MESES.
RONCAL	DE OVEJA	COAGULACION CON CUAJO ANIMAL. MADURACION A 10-15 °C Y 90 POR CIENTO DE HUMEDAD RELATIVA A CARGO DE BACTERIAS LACTICAS.
VEYOS	DE OVEJA Y CABRA	CUAJO ANIMAL; DESUERADO ESPONTANEO EN EL MOLDE 24 HORAS. AHUMADO LIGERAMENTE Y MADURADO A UNOS 20 GRADOS C A LA HUMEDAD AMBIENTAL UNOS 30 DIAS.
MAHON	DE VACA	CUAJO VEGETAL; ESCURRIDO EN LIENZO O "FOGASSER". SALMUERADO 48 HORAS; MADURACION LACTICA A 12-15 GRADOS C Y HUMEDAD RELATIVA 80-85 POR CIENTO. EL AÑEJO MADURA 4 MESES. SUELE IMPREGNARSE DE ACEITE EXTERNAMENTE.

de origen (a, *Pasiego;* b, *Villalón;* c, *Burgos;* d, *San Simón;* e, *Cabrales;* f, *Idiazábal;* g, *Roncal;* h, *Manchego)*

Burgos, se elabora en la provincia de Valladolid; por su forma se le conoce también como "queso de pata de mulo". Aunque generalmente se consume en fresco, en ciertas ocasiones se le deja madurar espontáneamente durante 5-7 semanas y se vende como madurado. Otros quesos frescos de consumo inmediato son los de Cervera y Puzol, propios de estos municipios levantinos y pueblos vecinos, que llevan además de leche de oveja, leche de vaca (en ocasiones también de cabra). Son quesos mixtos.

Los gallegos maduran por la acción de las bacterias lácticas (*S. lactis, L. plantarum*) y de *S. faecalis*, elaborándose con leche de vaca, cuajo animal y sal. Son de pasta blanquecina, muy blanda, de sabor agradable y con una corteza muy fina de color amarillo.

Los quesos semiduros poseen entre un 36 y un 40 por ciento de agua; son quesos prensados ligeramente y madurados no mucho tiempo; sobresale entre ellos el de Cabrales.

Los duros tienen de 25 a 36 por ciento de agua y en algunos casos (muy duros) menos del 25 por ciento. Su textura es tal que en ocasiones pueden desmigajarse con los dedos; han sufrido un prensado intenso y una maduración prolongada. Conviene tener en cuenta que un almacenamiento excesivo, en un ambiente seco, determina pérdidas de humedad y, por tanto, dureza. Para evitar el endurecimiento excesivo el queso Manchego se sumerge en aceite de oliva; para esto debe tener al menos 70 días. En estas condiciones, al abrigo de la luz y en sitio fresco y seco, se conserva bien hasta dos años.

Los quesos españoles se elaboran siguiendo en general una técnica semejante a la señalada en el artículo del profesor Frank V. Kosikowski en este mismo número de *Investigación y Ciencia*, por lo que aquí sólo nos referiremos a ciertas peculiaridades de determinados tipos de queso.

En las elaboraciones artesanales no se emplean cultivos iniciadores y aunque en ocasiones sean precisamente estos quesos los que alcanzan mayor calidad y demanda, a veces las diferencias entre lotes distintos del mismo queso artesanal son enormes; de aquí que para normalizar la producción se haya seleccionado estirpes microbianas iniciadoras ("fermentos" en el argot industrial) que, en condiciones ambientales adecuadas, permiten una maduración controlada del queso, obteniéndose productos de igual calidad.

En España la coagulación se realiza tradicionalmente con cuajo animal o vegetal; el primero se obtiene del cuajar o estómago de los rumiantes lactantes (terneros, corderos y cabritos). La renina que contiene actúa sobre la caseína (proteína principal de la leche) y la desestabiliza, dando lugar a la coagulación láctea. Determinadas plantas superiores (cardos del género *Cynara*) elaboran enzimas con poder coagulante, lo mismo que algunos mohos y bacterias. (El profesor Marcos y colaboradores, de la Facultad de Veterinaria de Córdoba, han estudiado con detalle las enzimas coagulantes de *C. humilis*.) El menor coste del cuajo microbiano y el no poder atender a la demanda mundial de cuajo animal han determinado que cada vez se utilice más el primero.

Aunque en muy pocos casos, en nuestro país se fabrican quesos mediante coagulación ácida de la leche, debida a la acción que las bacterias lácticas ejercen en la lactosa (azúcar de la leche) a la que transforman en ácido láctico. Cuando éste alcanza en la leche una concentración suficiente precipita la caseína y se forma el coágulo correspondiente. Entre los quesos fabricados por coagulación ácida citaremos el de la Armada, que se elabora en Vegamian y

Lillo (León), con leche calostral de vaca, y el de Badaía, en la sierra de su nombre (Alava), con leche de cabra.

Cualquiera que sea el tipo de cuajo usado, la cuajada resultante se corta para facilitar el desuerado o separación del suero; ocasionalmente se calienta para acelerarlo ("recalentado o recocido" del queso manchego).

Los quesos españoles se salan, en la mayoría de los casos, espolvoreando sal seca en su superficie o colocándolos en salmueras de concentración variable y durante un tiempo también variable, que depende del tipo de queso y de su tamaño. En algunos gallegos (San Simón e incluso Ulloa) la sal se añade a la leche antes de su coagulación.

El contenido de sal de la mayoría de nuestros quesos oscila entre 2 y 2,5 por ciento. A concentraciones mayores (4-5 por ciento) se retrasa el desarrollo de las bacterias lácticas y si se alcanza o supera el 6 por ciento sólo crecen algunos mohos y unas pocas bacterias de escaso interés madurativo. Además, el exceso de sal enmascara el sabor típico del queso.

Los fenómenos madurativos, que son distintos en los diferentes tipos de queso, se caracterizan en todos ellos por cambios degradativos de los principales componentes de la leche (proteínas, grasa y lactosa) que se fragmentan en sustancias mucho más pequeñas, cuya acumulación progresiva es la responsable del sabor y textura característicos de cada variedad. Las responsables de estos cambios son enzimas que proceden unas directamente de la leche, otras del cuajo y la mayoría son elaboradas por los microorganismos de la leche (o de los cultivos iniciadores).

Todos los factores ecológicos que influyen en el crecimiento microbiano lo harán también en el proceso madurativo; entre ellos la aireación, la humedad y la temperatura de los locales de maduración y, por supuesto, la acidez, el contenido salino de los quesos y la presencia de productos inhibidores bacterianos formados durante la maduración.

La aireación o ventilación aporta oxígeno requerido por los microorganismos aerobios superficiales; en el caso del Cabrales, el "pinchado" que sufre persigue la introducción de aire en su masa para estimular el crecimiento de *P. roqueforti* que es el responsable de su veteado azul.

La temperatura de maduración varía de unos quesos a otros y en condiciones ideales será de 5 a 8 grados C para el Cabrales, 7-10 para los gallegos y de 10-15 grados C para los de pasta prensada (Manchego, Roncal, etcétera). El empleo de temperaturas altas tiene el inconveniente de facilitar el desarrollo de microorganismos perjudiciales.

La humedad relativa del aire de los locales de maduración debe ser alta, pues en caso contrario el queso se deseca con demasiada rapidez; la maduración acaece a humedades relativas del 80 al 90 por ciento, salvo en los quesos de Cabrales y Gamonedo, que necesitan humedades mayores.

El número de microorganismos de la leche empleada para la fabricación de quesos en España es muy alto y está formado por especies microbianas muy diversas; por ello se encuentran al principio en el queso recién hecho bacterias muy variadas que después, durante la maduración, desaparecen hasta que finalmente son las lácticas las que predominan. De todos modos, y puesto que algunas bacterias patógenas pueden permanecer vivas cierto tiempo, la legislación alimentaria actual prohíbe la venta de quesos elaborados con leche cruda hasta que no hayan transcurrido por lo menos dos meses desde su elaboración.

Los microorganismos responsables

de la maduración de aquellos quesos españoles cuya fermentación se ha estudiado, son bacterias lácticas semejantes a las encontradas en otros tipos de quesos extranjeros. Se trata generalmente de estreptococos, lactobacilos y algunos *Leuconostoc*. En la maduración de los quesos de Cabrales y Gamonedo desempeña el papel principal el moho *Penicillium roqueforti*, el mismo que toma parte en la maduración del famosísimo Roquefort. También intervienen algunas levaduras (*Pichia* y *Debaryomyces*, principalmente). En el queso madurado de Mahón se han encontrado otras especies de levaduras, entre las que destaca *Saccharomyces italicus*.

De los quesos españoles que mayor fama gozan, tres (Cabrales, Roncal y Mahón) se hallan acogidos a la denominación de origen, lo que significa que los aspectos técnicos que influyen en su calidad, las características de la materia prima, su elaboración, maduración y presentación en el mercado, deben llevarse a cabo de acuerdo con el correspondiente reglamento de denominación de origen. Son precisamente estos quesos los que han sido mejor estudiados.

Digamos, como resumen, que los quesos españoles para competir internacionalmente necesitan: 1) una leche (de oveja y cabra especialmente) de mejor calidad microbiológica que la actual; 2) la normalización del proceso de elaboración de muchas variedades y 3) una promoción y publicidad comercial eficaces. (Bernabé Sanz.)

Segmentos, parasegmentos y compartimentos

La segmentación es una de las estrategias básicas más utilizadas en la construcción anatómica de los animales. Los segmentos forman una serie de elementos fundamentalmente homólogos, pero con un grado de especialización característico para cada elemento. En algunos animales, como el ciempiés y la lombriz, los segmentos son casi idénticos, mientras que en otros, como la abeja o la mosca doméstica, difieren mucho entre sí. La organización en segmentos es muy general, utilizándose incluso en los animales superiores, como es evidente en la reiteración de los elementos que componen la columna vertebral. Dada la importancia de la segmentación, no es de extrañar que se hayan dedicado muchos esfuerzos a entender cómo, durante el desarrollo embrionario, se implanta y se controla el plan básico de organización segmental. Los avances más notables se han realizado en la mosca de la fruta *Drosophila melanogaster*.

Hoy día se sabe que la mosca está construida por módulos, los llamados compartimentos, originados cada uno de ellos por varias decenas de células cuya descendencia se restringe a formar una zona perfectamente delimitada de la superficie de la larva o del adulto (ver "Compartimentos en el desarrollo de los animales", por A. García-Bellido, P. A. Lawrence y G. Morata, INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, septiembre de 1979). Las células fundadoras de un compartimento determinado varían de un animal a otro, aunque siempre se encuentran en una misma región anatómica. Sus descendientes proliferan hasta ocupar todo el compartimento, pero jamás cruzan los límites invariables del mismo. Mediante el análisis clonal, se pueden distinguir dos compartimentos en la mayoría de los segmentos de la mosca, uno anterior y otro posterior, siendo muy notable el hecho de que la frontera entre los mismos no corresponda a ninguna estructura anatómica visible. Hay, pues, una "soldadura" perfecta entre ambos compartimentos, a pesar de que las células que los forman tienen linajes diferentes. Por ejemplo, en el caso del segundo segmento torácico, la línea de separación de estos dos compartimentos del ala es rectilínea, dividiéndola en una mitad anterior y otra posterior, pero sin coincidir con ninguna estructura morfológica. Por otro lado, también se sabe que tanto el número como la identidad de los distintos compartimentos están controlados por un número de genes reducido. Así, la identidad de los compartimentos comprendidos entre el posterior mesotorácico y el anterior del octavo segmento abdominal está regulada por los genes del complejo *bithorax* (C-BX); mutaciones en el C-BX hacen que compartimentos comprendidos entre estos límites diferencien estructuras propias de otros compartimentos anteriores o posteriores.

En el embrión de *Drosophila*, los primeros esbozos anatómicos de segmentación aparecen a las 7 u 8 horas de desarrollo en forma de surcos transversales en el ectodermo. Tradicionalmente se ha considerado que las regiones entre los surcos son los esbozos de los futuros segmentos larvarios y, los surcos propiamente dichos, son las fronteras entre los segmentos, de modo que cada uno de los 14 primordios segmentales visibles corresponde a un segmento de la larva o de la mosca adulta. Sin embargo, Alfonso Martínez-Arias y

Peter Lawrence sugieren ahora una interpretación distinta (*Nature 313*, 639-642 (1985)). Según estos autores, los primordios segmentales no definirían los futuros segmentos sino que corresponderían al compartimento posterior de un segmento y al anterior del segmento siguiente. Los autores denominan parasegmentos a estos elementos segmentales del embrión temprano. Los parasegmentos y los futuros segmentos larvarios estarían desfasados en la longitud de un compartimento. Esta diferencia no es conceptualmente trivial, pues refleja una neta distinción entre nuestra apreciación subjetiva de lo que es la segmentación del animal y la denominada por S. Brenner "representación interna" del organismo. Evidentemente, es esta última la que contiene el plan básico de construcción del animal.

A. Martínez-Arias y P. Lawrence basan sus conclusiones en varias observaciones experimentales. Así, estudios genéticos indican que el gen *Ultrabithorax* (*Ubx*), dentro del C-BX, opera sobre todo en los dos parasegmentos adyacentes que incluyen los compartimentos comprendidos entre el posterior mesotorácico y el anterior del primer segmento abdominal. Estos estudios han sido confirmados recientemente mediante hibridaciones *in situ* del ARN de cortes histológicos de embriones, al demostrar que, a partir de la blástula, la expresión del gen *Ubx* es máxima dentro del segundo de estos parasegmentos.

Otra prueba citada por los autores se funda en la situación y número de los esbozos de las fosas traqueales embrionarias. Estas fosas aparecen casi al mismo tiempo que la serie de surcos transversales; hay una pareja de fosas dentro de cada una de las regiones tradicionalmente consideradas como los primordios de los segmentos torácicos y abdominales. Sin embargo, A. Martínez-Arias y P. Lawrence citan un estudio de Keilin, quien observó que en distintos grupos de insectos el número de parejas de fosas traqueales o espiráculos es siempre uno menos que el de segmentos torácicos y abdominales. Keilin propuso, por tanto, que las fosas traqueales no se originan dentro de los segmentos, sino en la frontera entre los mismos. A. Martínez-Arias y P. Lawrence sugieren ahora que los surcos embrionarios marcan las fronteras entre parasegmentos. Estos últimos autores analizan además, en apoyo de esta interpretación, otras tres líneas de prueba. Recalcan además que la subdivisión del embrión en parasegmentos, y de cada parasegmento en dos compartimentos, se aplicaría solamente al ectodermo, pues no hay datos que indiquen la existencia de compartimentos anteriores y posteriores en el mesodermo, aunque el análisis clonal ha revelado que se respetan los límites segmentales en los linajes de las células musculares. De todos modos, el mesodermo embrionario se halla, asimismo, subdividido en masas separadas por surcos, encontrándose dichas masas aproximadamente en fase con los parasegmentos ectodérmicos.

Martínez-Arias y Lawrence proponen que, en un momento posterior del desarrollo, ocurre un desplazamiento en la longitud aproximada de un compartimento de parte o todo el mesodermo hacia el extremo posterior del animal; con esto, los parasegmentos mesodérmicos quedarían en fase con los segmentos ectodérmicos. Por todo ello, estos autores sugieren que el mesodermo queda subdividido en la mitad de compartimentos que el ectodermo y que tales compartimentos corresponden en realidad a parasegmentos.

Si, según estas interpretaciones, los compartimentos y parasegmentos son las unidades básicas del diseño de la mosca, ¿qué papel desempeñan en este esquema los segmentos? Martínez-Arias y Lawrence sugieren que la razón principal por la cual los segmentos larvarios y del adulto se han definido como unidades morfológicas es que la cutícula se flexiona en los bordes de los mismos; ello se debe a que en estos lugares es donde se fijan los músculos longitudinales del animal. Los segmentos se definirían, pues, relativamente tarde en el desarrollo, por cuanto en los mioblastos se diferenciarían y establecerían las conexiones musculares longitudinales entre segmentos. Los autores hacen hincapié en que la definición de los segmentos tiene sólo carácter descriptivo, pues se desconoce si el genoma de la mosca especifica los segmentos de la misma manera en que define los compartimentos y, probablemente, los parasegmentos. Evidentemente, puesto que el análisis clonal ha demostrado que los compartimentos se establecen en momentos muy tempranos del desarrollo, ya en la fase de blastodermo, no cabe duda de que los compartimentos constituyen unidades reiterativas fundamentales en la "representación interna" de la mosca. A ellos parecen añadirse ahora los parasegmentos. Estudios adicionales habrán de aclarar el papel de los segmentos en el diseño básico de este organismo. (Juan Modolell.)

El queso

Las 2000 variedades de queso conocidas se elaboran de la leche a través de un proceso que suele constar de nueve etapas. Las modificaciones introducidas en alguna de ellas determinan la especialidad producida

Frank V. Kosikowski

Viajando por el mundo y contando las variedades de queso vistas, se llegaría a la conclusión de que hay unas 2000 distintas. Pero se trata de variaciones en torno a unos 20 tipos básicos, que se elaboran siguiendo, en lo fundamental, el mismo proceso. Todos los quesos se fabrican con leche, aunque no siempre con la de vaca. La leche se coagula con ácido o con cuajo (renina); del coágulo formado se separa el suero. Lo que suceda después determinará que el queso que llegue a la mesa sea fresco, Cheddar, Emmental o cualquier otro tipo del amplio espectro.

Se cree que el queso se originó en el sudoeste de Asia, hace unos 8000 años. Los romanos, durante sus conquistas europeas entre el año 60 a.C. y el 300 d.C., fomentaron las mejores técnicas y estimularon el desarrollo de nuevas variedades. Su influencia se refleja en la etimología: *caseus*, nombre latino del queso, constituye la raíz de su denominación actual.

Los quesos se clasifican de forma amplia y sencilla en dos grupos: frescos y madurados. El queso fresco se prepara con leche coagulada con ácido o con calor a temperatura elevada, debiendo consumirse poco tiempo después de elaborado, ya que, de lo contrario, se deteriorará. El ejemplo más familiar es el requesón, pero en esta categoría se incluyen otros, como el cremoso, el Neufchatel, ricotta y mozzarella.

El queso madurado se fabrica con leche fermentada por las bacterias lácticas ácidas y coagulada por un preparado enzimático. El coágulo se presiona para eliminar el suero y se sala; a continuación, se mantiene durante un período de tiempo bastante dilatado en un ambiente controlado. Durante ese tiempo, se desarrollan una serie de cambios físicos y químicos que aportan al producto su aroma y textura característicos y su clasificación dentro de una variedad de queso. La mayoría son quesos maduros. Gran parte del madurado se vende sin someterlo a ningún otro tratamiento ulterior, pero una cantidad importante del mismo se tritura, se trata por calor y se emulsiona con fosfato sódico y otras sales para obtener queso fundido.

Variedades de leche

Aunque las vacas proporcionan la mayor parte de la leche destinada a la fabricación del queso, en muchas partes del mundo se utiliza más la de otros animales. En el sudoeste de Asia y a lo largo de la ribera mediterránea, las ovejas y cabras suministran esa materia prima. Francia tiene más de un millón de cabras de ordeño y gran número de ovejas cuya leche se destina, fundamentalmente, a la elaboración del Roquefort. Entre los animales que, en otras partes del mundo, proporcionan leche para fabricar queso, deben citarse búfalos de agua, camellos, yaks, renos y llamas.

La leche de cualquier mamífero podría convertirse en un queso aceptable, quizá singular; las cantidades disponibles o recolectables limitan estas posibilidades. ¿Cómo ordeñar un cobaya hembra, o una ballena de 100 toneladas desplazándose por la inmensidad de los mares? Barbour L. Herrington, de la Universidad de Cornell, que estudió la composición de la leche de los micromamíferos, diseñó, hace algunos años, una máquina de ordeño para cobayas, pero tal invento no llevó a la elaboración de queso de cobaya ante el enorme número de individuos necesarios para producir leche suficiente con que preparar sólo una modesta pieza cilíndrica.

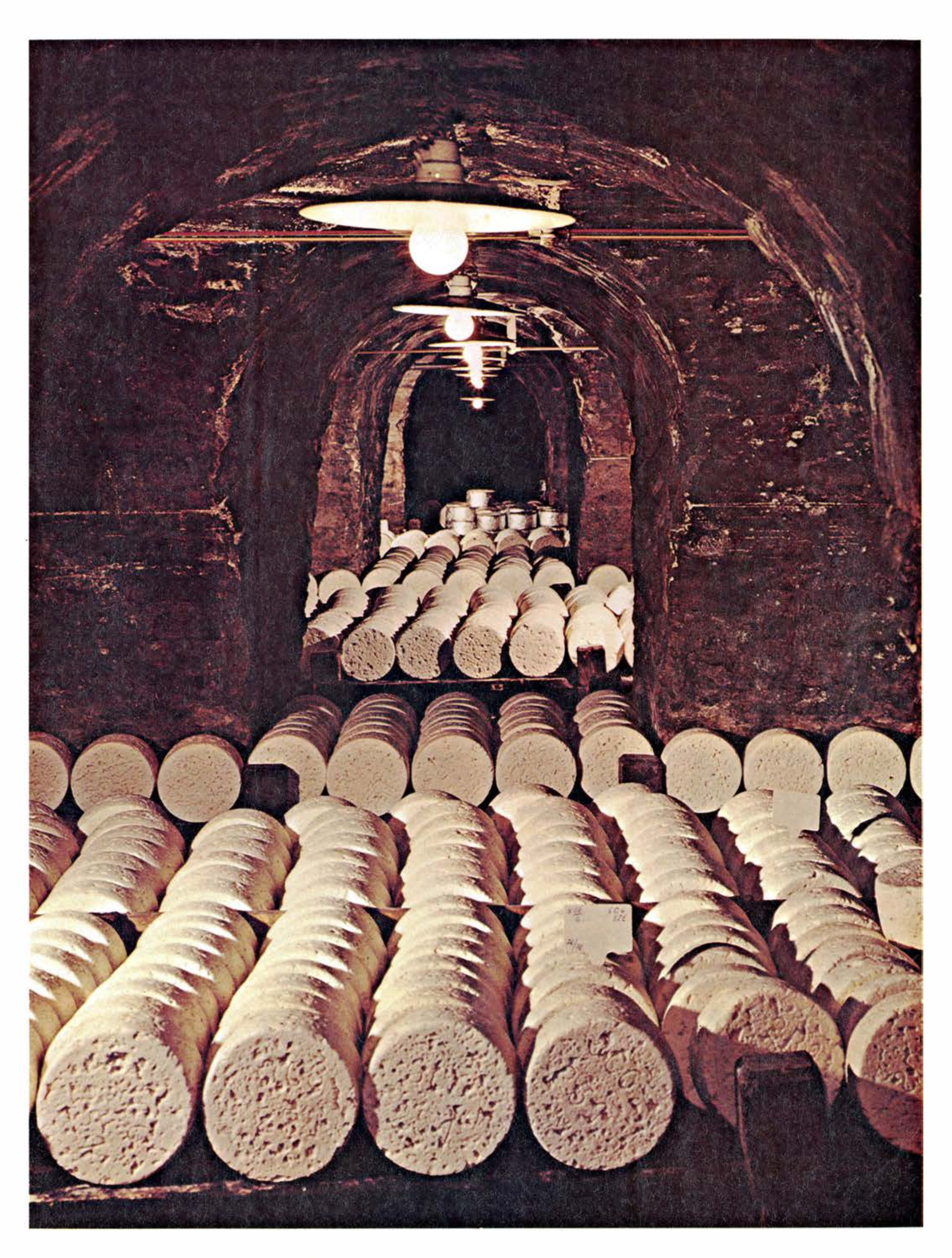
Igual que la variedad de uva influye en el aroma y el bouquet del vino, el origen de la leche influye también en el sabor y aroma del queso madurado. La leche de cabra proporciona un queso con un aroma más manifiesto y picante que el de la leche de vaca, debido principalmente a que su grasa contiene más ácidos caproico, caprílico y cáprico. Estos ácidos grasos se diferencian por la longitud de su cadena carbonada: seis carbonos en el caproico, ocho en el caprílico y 10 en el cáprico; los distintos tipos de cadena proporcionan a la leche un carácter punzante distinto. La leche de cabra contiene dos veces más ácido caproico que la de vaca, tres veces más ácido caprílico y cinco veces más cáprico.

La leche de oveja da quesos de un aroma característico, ya que contiene seis veces más ácido caprílico que la de vaca y dos veces más que la de cabra. Por otra parte, sólo tiene la mitad de ácido cáprico que la leche de cabra. En la leche fresca, apenas se notan estas diferencias de sabor. El aroma distintivo sólo se aprecia cuando el queso, recién hecho con una de estas leches, se deja madurar y se liberan los ácidos grasos de las moléculas grasas, bajo la acción de enzimas denominadas lipasas.

La leche influye también en el color del queso natural. La de oveja, búfalo de agua o de ciertas cabras es muy pobre o carece de betacaroteno, un pigmento amarillo; en consecuencia, los quesos elaborados con ellas son predominantemente blancos. La leche de vaca contiene una concentración variable de betacaroteno, acorde con la época del año, la raza de la vaca y los alimentos que haya comido; el color natural del queso resultante varía desde el pajizo hasta el amarillo manzanilla.

Papel de los microorganismos

La maduración del queso es labor de un gran número de microorganismos que alcanzan concentraciones entre las mayores que se dan en cualquier alimento básico. En el primer día del proceso de elaboración, su número varía, en el material de partida (materia prima), de 1000 a 2000 millones de bacterias por gramo. Después, este número disminuye ante la deficiencia de oxígeno, la acidez alta y la presencia de



1. QUESO ROQUEFORT madurando en una de las cuevas del pueblo de Roquefort, sito en el sur de Francia. Este queso semiblando, enmohecido de azul, se elabora con leche de oveja y se le confiere una forma cilíndrica, pesando cada unidad unos 2,5 kilogramos. Para poder denominarlo Roquefort, debe elaborarse según esas normas y madurar varios meses en una de las cuevas de piedra caliza del pueblo. A los quesos similares, fabricados con otros tipos de leche o madurados en otros lugares, se les llama *Bleu*. El microorganismo de la maduración es el hongo *Penicillium roqueforti*.

sustancias inhibidoras que se producen a medida que el queso madura. Por fortuna, los microorganismos madurativos son inocuos, si no beneficiosos; en gran parte, el aroma del queso madurado se debe a la acción de las enzimas microbianas en la lactosa, la grasa y las proteínas.

Antiguamente, las bacterias y hongos que inician la fermentación que da lugar al queso terminado, llegaban con la propia leche, transportados por el aire desde sus ambientes naturales, que son vegetales y suelos. Entre 1890 y 1920, varios investigadores, en Europa y en Estados Unidos, aislaron cultivos puros de tales microorganismos. Así, el microbiólogo J. M. Sherman, de la Universidad de Cornell, aisló y cultivó un microorganismo productor de gas, llamado inicialmente *Propionibacterium shermanii*, esencial para la producción de los ojos, o agujeros, y del típico aroma del queso suizo.

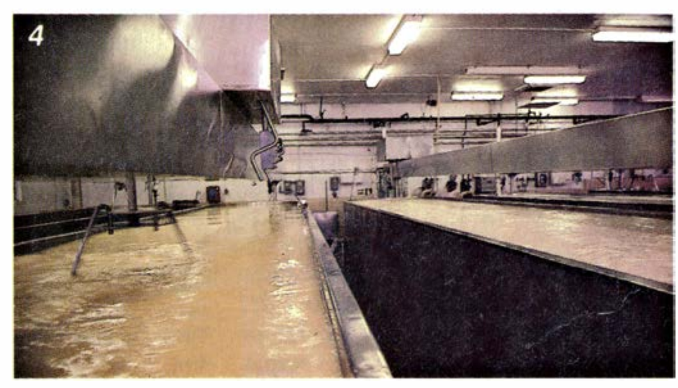


2. QUESO CHEDDAR elaborado en la fábrica Great Lakes Cheese of New York, Inc., de Adams, en el estado de Nueva York. Una vez se ha preparado la leche de vaca agregándole bacterias lácticas, responsables de la fermentación, y un colorante, se le añade renina (un preparado enzimático) para formar la cuajada (*1*). Después de unos 30 minutos, la cuajada se corta con barras metálicas (*2*) para aumentar su extensión superficial. Los cubos de cuajada se calientan (*3*) aproximadamente una hora, con lo que, al desprender el suero, se secan más (*4*). A continuación, se rastrillan, se compactan y se

Pronto se comprobó que la adición de cultivos puros a la leche cruda de baja calidad suprimía los microorganismos alterantes y mejoraba la calidad del queso resultante. Más tarde, cuando calentar o pasterizar la leche se convirtió en práctica normal, eliminando la mayoría de los microorganismos, los cultivos puros se hicieron imprescindibles para proporcionar la variedad y cantidad de bacterias necesarias.

Las mejoras en las técnicas de cultivo bacteriano han permitido disponer de cultivos iniciadores concentrados y congelados. Cualquiera de éstos contiene hasta 400.000 millones de bacterias lácticas por gramo. Puesto que en la leche tibia crecen inmediatamente, pueden incorporarse directamente a los tanques de coagulación de las queserías, sin necesidad de cultivarlos antes. Además, y dado que los cultivos se seleccionan de antemano basándose en su resistencia a los bacteriófagos (virus que in-



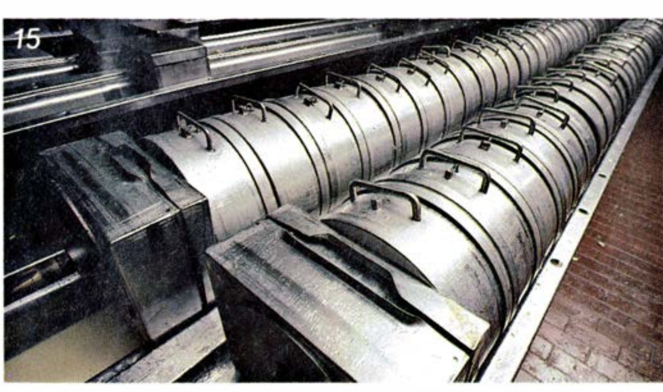














les da vueltas repetidamente (*5-9*), en la etapa crucial de la cheddarización, que ayuda a conferir a este queso su textura característica. Los bloques resultantes se trituran (*10*). Se sala el queso (*11*), se envuelve en gasa (*12-14*) y se prensa en los moldes llamados cercos (*15*) para expulsar el suero restante.

Tras sacarlos de los moldes y colocarlos en cajas, los quesos se dejan madurar de dos a doce meses a temperaturas de 2,5 a 10 grados C, tomándose muestras con cierta frecuencia (*16*). Alrededor de los dos tercios del queso madurado de elaboración industrial en los Estados Unidos corresponden al Cheddar.

vaden y destruyen las células bacterianas, paralizando la fermentación), la fabricación del queso se ha hecho más fácil y predictible.

Durante la maduración de muchas variedades de queso, los microorganismos desarrollan otra acción: agregados a la superficie de la cuajada o inyectados en ella, producen el aroma y la textura que identifican a la correspondiente variedad de queso.

Cualquiera que sea el tipo de queso que se pretenda elaborar, el proceso suele abarcar nuevas etapas: (1) preparación de la leche, (2) coagulación, (3) cortado, (4) calentamiento, (5) separación del suero (desuerado), (6) salado de la cuajada, (7) incorporación de microorganismos específicos, (8) prensado de la cuajada y (9) maduración del queso recién preparado. En general, el énfasis puesto en alguna de estas etapas es el que lleva al queso deseado.

Por norma, para elaborar queso madurado se utiliza leche cruda o subpasterizada; también puede emplearse la enteramente pasterizada, pero suele preferirse la primera. Las enzimas de los microorganismos que sobreviven a la temperatura baja mejoran el aroma del queso. En los Estados Unidos, el queso madurado y fabricado con leche cruda o subpasterizada debe almacenarse al menos durante 60 días. En este tiempo, la sal, la acidez, los metabolitos originados durante la maduración y la ausencia de oxígeno destruyen los microorganismos productores de toxiinfecciones alimentarias.

Entre las primeras fases de la preparación de la leche tenemos la adición de un colorante; agentes colorantes son el betacaroteno y los extractos de semillas y plantas. La bija o achicote, un colorante rojo-amarillento elaborado con la pulpa de la fruta de este árbol tropical (*Bixa orellana*), es uno de tales extractos; el pimentón es otro.

Se agrega luego el cultivo iniciador. Los cultivos de la mayoría de los quesos madurados son de bacterias que producen sólo ácido láctico a partir de la lactosa, un azúcar de la leche que cumple varias funciones. Cultivos diferentes producen cantidades bastante distintas de ácido láctico. La porción de ácido láctico producida influye mucho en el sabor y textura de los quesos y, también, en la cantidad de ojos que presentan.

En muchos quesos madurados naturalmente, el cultivo iniciador está formado por bacterias que crecen bien a temperaturas moderadas (de 20 a 37 grados), como *Streptococcus cremoris* y *S. lactis*. Los quesos que, como el Emmental, se elaboran con cuajadas calentadas a temperaturas relativamente elevadas, requieren que las bacterias del cultivo iniciador se desarrollen bien a temperaturas de 37 grados C o por encima de ellas; en este caso, las elegidas son *S. thermophilus, Lactobacillus bulgaricus* y *L. helveticus*.

Formación de la cuajada

Una vez preparada, la leche se transforma en un coágulo suave y sólido, merced a la acción de una enzima coagulante, la quimosina o renina, nombre este último más familiar. Procede del cuajo que, como extracto, se obtenía sólo del cuarto estómago de las terneras. La renina se extrae hoy de ciertos hongos: *Mucor miehei, M. pusillus* y *Endothia parasiticus*. Por ser las reninas fúngicas más baratas que las de ternera, han conquistado casi la mitad del mercado.

Cuando la renina actúa adecuadamente, forma un coágulo suave en unos 30 minutos, a 32 grados C de temperatura. La reacción se desarrolla en dos fases. La quimosina ataca a la caseína, una de las proteínas de la leche, pero no a las proteínas solubles como la lactalbúmina y lactoglobulina. Las fracciones residuales de caseína coagulan en presencia de los iones de calcio. El gen resultante posee una estructura fibrosa. Sus filamentos se entrecruzan y curvan en una red que, en condiciones de reposo, es suave y firme, constituyendo la cuajada. La proteína de este coágulo de quimosina se denomina paracaseína, pero al estar en gran parte unida al calcio se presenta, inicialmente, como paracaseinato dicálcico.

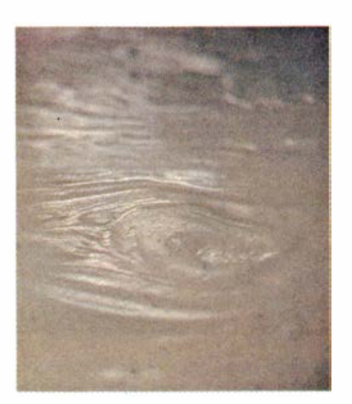
En la tercera fase, se utilizan alambres o barras metálicas cortantes para reducir la cuajada de los tanques de coagulación a porciones cúbicas de unos 1,5 centímetros de lado; esta fase aumenta, pues, el área superficial.

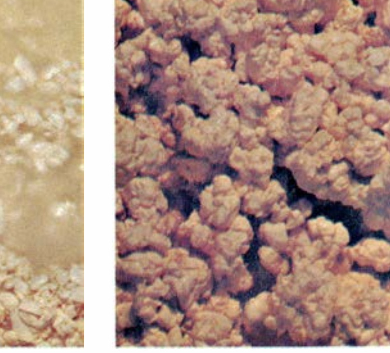
Durante el período de calentamiento subsiguiente, las porciones cúbicas se contraen y liberan suero. En ese momento, el maestro quesero, variando la temperatura de calentamiento y la velocidad de agitación de la cuajada y del suero, influye, hasta cierto punto, en la humedad final del queso. En el queso Cheddar y en especies similares, la temperatura óptima de calentamiento es 37 grados C; las cuajadas del Emmental y del Gruyère se calientan a unos 54 grados C. El calentamiento continúa durante un período que oscila de una hora a una y media. Se elimina entonces el suero, que deja una cuajada tibia o caliente que presenta estructura de queso, aunque todavía inmaduro.

El maestro quesero puede mejorar esta estructura dando vueltas repetidamente a la cuajada en el tanque, o dejándola bajo presión en grandes recipientes con forma de cuenco o similar. Durante este tiempo, la actividad del cultivo iniciador produce ácido láctico y la naturaleza química de la cuajada cambia.

A continuación se procede al salado. En algunos casos, se añade sal seca a la cuajada; no obstante, si se ha presionado la cuajada para darle forma de bloque o de cilindro, la sal puede sustituirse por salmuera. Se acostumbra a sumergir los quesos inmaduros en salmuera saturada de 2 a 72 horas, según sea el tamaño del queso.

Si el queso que se está elaborando necesita que se sumen microorganis-






3. CAMBIOS DE TEXTURA del queso Cheddar a lo largo de las distintas fases de su elaboración. Cuando se añade la renina, presenta consistencia lechosa, después de flan o cuajada y, más tarde, se vuelve firme, a medida que aumenta la cantidad de suero eliminado. (Fotografías de James Kilkelly.)

mos especiales que ayuden a su maduración, pueden añadirse a la salmuera. También pueden agregarse a la leche durante la fase de preparación, o rociar con ellos la superficie del queso inmaduro.

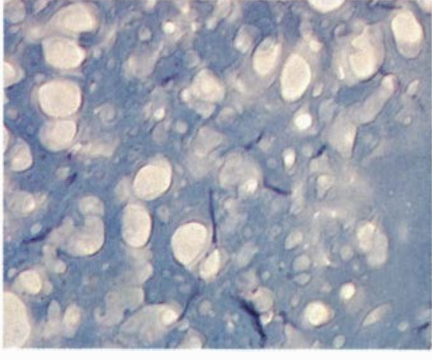
En la fase de prensado, la cuajada, húmeda y tibia, se coloca en un molde de madera, de plástico o de metal, o en una bolsa de tela, aplicándole a veces una presión externa. La presión proporciona al queso una textura compacta y una forma característica; expulsa también los restos de suero libre que queden y completa la unión de la cuajada.

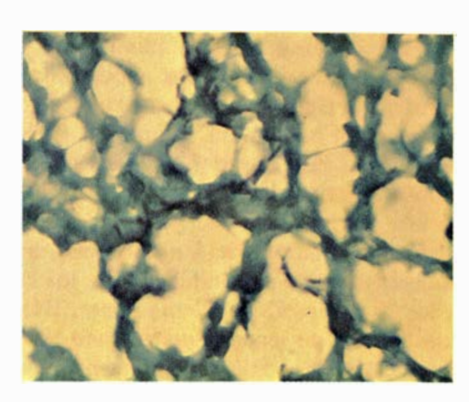
El prensado constituye el final de lo que podríamos denominar fase preparatoria de elaboración del queso madurado. Inmediatamente, el queso joven se coloca en un ambiente controlado, donde tendrán lugar los procesos madurativos cruciales.

El factor fundamental de la maduración es la muerte de los millones de bacterias lácticas presentes al iniciarse esta fase. El proceso continúa durante todo el período madurativo. Al morir, las células bacterianas se desintegran, liberando muchas enzimas intracelulares. Estas enzimas (junto con la quimosina residual y las enzimas de la leche) transforman la proteína, la grasa y los carbohidratos; en consecuencia, el queso comienza a desarrollar su aroma típico y una textura suave.

En los primeros estadios de la maduración, el queso es rígido, debido a la presencia de paracaseinato dicálcico; al calentarlo, ni funde, ni se torna filamentoso. A medida que aumenta la cantidad de ácido láctico en la cuajada, se disuelve más calcio ligado y se forma un nuevo compuesto, el paracaseinato monocálcico; se trata de una sustancia, soluble en agua salada tibia, que se estira con facilidad y se funde uniformemente al calentarla.

A las 48 horas de someterse a presión, gran parte del paracaseinato dicálcico se ha convertido en paracaseinato monocálcico. Bajo la presencia continua del ácido láctico, aumenta el calcio disuelto y parte del paracaseinato monocálcico se transforma en paracaseína. Este compuesto sirve de substrato para ciertas enzimas, las proteasas, que descomponen las proteínas en peptonas y péptidos, y las peptidasas que, a su vez, rompen los péptidos en los aminoácidos integrantes. A partir de estas sustancias, se acumulan en el queso en maduración péptidos solubles, aminoácidos libres y aminas que contribuyen al aroma típico del queso terminado. La acción concentrada de las enzimas degrada también partes de









4. ESTRUCTURA DEL QUESO puesta de relieve en estas microfotografías (*arriba*) del queso Parmesano (*izquierda*) y del Camembert (*derecha*); están tomadas a unos 2500 aumentos. Debajo se presentan las correspondientes fotografías del queso tal y como lo ve el consumidor. El Parmesano es un queso duro; el Camembert, blando. Las microfotografías fueron cedidas por Roger Maret, de la empresa suiza Nestlé.

la estructura rígida inicial de la cuajada: el queso se hace más blando.

El aroma típico del queso madurado depende, en gran parte, del equilibrio relativo de los componentes aromatizantes procedentes de la degradación de las proteínas, las grasas y los carbohidratos. El exceso de uno de estos compuestos, al alterar el equilibrio, produce aromas desagradables: amargo, rancio, fuerte o sulfuroso. El arte de la elaboración de los quesos reside en alcanzar el equilibrio deseado.

Si la maduración se controla debidamente, la grasa del queso se hidroliza en parte (se rompe mediante una reacción química en la que interviene el agua), merced a las enzimas microbianas y a la lipasa de la leche; el producto de la reacción es los ácidos grados libres. Algunos de ellos, como el caproico, caprílico y cáprico, da lugar a aromas picantes. De los ácidos grasos proceden, también, diversas cetonas que proporcionan los aromas, especialmente característicos, del queso azul. Importa también que la hidrólisis se haga pronto más lenta pues, en otro caso, el queso madurado presentará, invariablemente, un sabor fuerte y desagradable y despedirá un olor molesto.

La lactosa de los quesos madurados contribuye también a su aroma; se convierte en ácido láctico y lactatos que, a su vez, se transforman en otros compuestos orgánicos, como el diacetilo.

A medida que el queso madura, produce generalmente gas. En los quesos Cheddar y Emmental, es dióxido de carbono, en el Camembert y en el Brie, el dióxido de carbono cede el paso al amoníaco, que rebaja la calidad del queso. Durante la maduración normal, el ataque que sufren los aminoácidos libres por parte de enzimas asociadas a ciertos grupos bacterianos específicos, como los enterococos, constituye una fuente constante de dióxido de carbono. En el queso también puede originarse hidrógeno, ácido sulfhídrico y una cantidad excesiva de dióxido de carbono. Tales acontecimientos indican una fermentación anormal y dan un queso de baja calidad.

En los quesos que tienen cortezas duras (como el Emmental), lo mismo que en los que están envueltos con una película plástica gomosa muy impermeable a los gases (como el queso suizo), se desarrollan ojos. Fenómeno que se hace patente cuando se adiciona a la leche *Propionibacterium* y el queso se mantiene caliente durante varias semanas. Cada ojo se forma a partir de una burbuja de dióxido de carbono.

Variedades

El proceso general aquí descrito varía en razón del tipo específico de queso que se pretende elaborar. Algunos ejemplos del amplio campo de que-

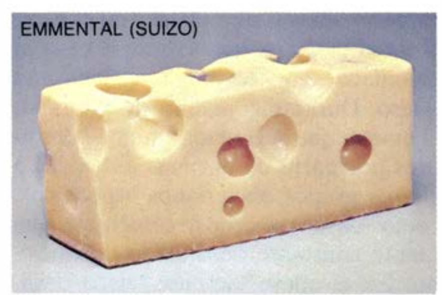
sos duros, semiblandos y blandos madurados naturalmente nos ayudarán a mostrarlo. Entre los quesos duros se incluyen el Cheddar, el Emmental y el Provolone. El queso Cheddar, cuyo nombre deriva de un pueblo inglés en donde se inició su elaboración en el siglo XVII, madura de 5 a 12 meses, a temperaturas comprendidas entre los 2 y los 10 grados C. Corrientemente, 100 kilogramos de leche proporcionan 9,5 de queso Cheddar; el rendimiento varía de acuerdo con las concentraciones de grasa y proteínas de la leche, y con la cantidad de humedad del producto terminado. El detalle más característico del proceso de elaboración es la fase de cheddarización, o amasado, que consiste en dar vueltas, durante varias horas, a los bloques tibios de cuajada en el fondo del tanque de cuajar.

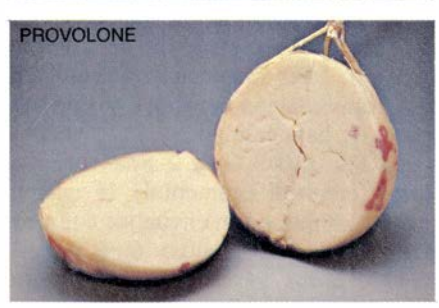
El queso Emmental adquiere su corteza amarillenta lavando diariamente su superficie; este queso se caracteriza por sus ojos, que son mayores en los Estados Unidos que en Europa. La fermentación láctica del queso Emmental corre a cargo de bacterias termófilas (amantes del calor). La mayor parte de la fermentación originada por estas bacterias acaece durante la fase de prensado. El Provolone se fabrica principalmente en Italia, Argentina y Estados Unidos. En las primeras fases, se trata igual que el queso Mozzarella, de poca humedad, normalmente utilizado en las pizzas. El Provolone se denomina de *pasta filata* (pasta hilada). El queso inmaduro se moldea dándole forma de embutido, de pera o de bola y, después, al envasarlo, se enrollan los hilos. Corrientemente se ahuma, dejándose luego madurar, hasta que adquiere su aroma característico.

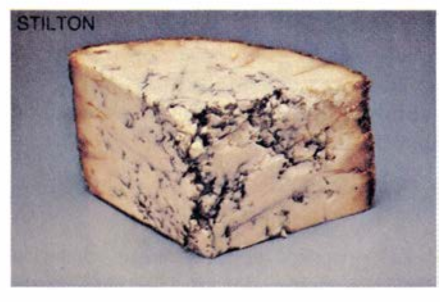
Los quesos semiblandos comprenden el Roquefort y los quesos azules. El Limburger, Camembert y Brie son quesos blandos. Ambos grupos sólo tienen en común requerir aire para sus microorganismos madurativos específicos: el hongo *Penicillium roqueforti* para los quesos Roquefort y azules, la bacteria rojiza *Bacterium linens*, para el Limburger, y el hongo *P. caseicolum* (conocido en la industria quesera como *P. candidum*) para el Camembert y el Brie. Cada microorganismo de éstos se cultiva en un medio líquido especial y se transfiere al queso en condiciones estériles.

El Roquefort es un queso azul, madurado por hongos, elaborado con leche de oveja, que se fabrica al sur de una línea que une Burdeos y Grenoble; Córcega es también zona de producción de este queso. (Los quesos france-









QUESO	LECHE	METODO DE MADURACION
QUESOS DUROS		
ASIAGO	VACA U OVEJA	CURADO HASTA UN AÑO, LAVADO Y VOLTEADO FRECUENTEMENTE, IMPREGNADO A VECES CON ACEITE VEGETAL.
CHEDDAR	VACA	CURADO A 2-10 °C DE 60 DIAS A 12 MESES.
COLBY	VACA	CURADO DURANTE 60 DIAS O MAS.
EDAM	VACA	COLOCADO EN CAPAS A 10-15 °C, DE 6 A 8 SEMANAS. LAVADO, SECADO Y VOLTEADO FRECUENTEMENTE.
EMMENTAL (SUIZO)	VACA	FORMACION DE OJOS EN 3-4 SEMANAS A 22 °C y 80-85 % DE HUMEDAD RELATIVA. MADURADO A 5 °C O MAS, DE 2 A 10 MESES.
GOUDA	VACA	CURADO A 10-15 °C, DE 2 A 6 MESES.
GRUYÈRE	VACA	FORMACION DE OJOS A 15 °C EN UN MES. CURADO DURANTE 80 DIAS O MAS A 10-15 °C.
PARMESANO	VACA	MANTENIDO 10 MESES O MAS A 10 °C Y A UNA HUMEDAD RELATIVA DEL 85 %. VOLTEADO, LAVADO, RASPADO Y, EN OCASIONES, IMPREGNADO CON ACEITE.
PROVOLONE	VACA	AHUMADO Y MADURADO A 5-10 °C, HASTA 12 MESES.
STILTON	VACA	ENMOHECIDO CON *PENICILLIUM ROQUEFORTI* DURANTE DOS SEMANAS. MADURADO DURANTE UNOS SEIS MESES.
QUESOS SEMIBLANDOS		
BLEU (AZUL)	CABRA O VACA	ENMOHECIDO CON *P. ROQUEFORTI*, CURADO TRES MESES A 9 °C y 95 % DE HUMEDAD RELATIVA, ENVUELTO EN PAPEL DE ALUMINIO Y ALMACENADO EN UN LUGAR FRIO DE DOS A TRES MESES.

5. EL METODO DE MADURACION del queso está muy relacionado con el desarrollo de su textura y aroma característicos. La tabla expone las principales fases por las que se atraviesa en la maduración de 20 quesos bien conocidos, clasificados según sean duros, semiblandos o blandos. Los quesos madu-

ses de tipo Roquefort, elaborados con otras clases de leche, se denominan *Bleu*, y en los Estados Unidos y otros países se elaboran quesos similares, con venas azules, de cuyo color reciben el apelativo). La forma normal de un queso Roquefort es la de una rueda, o cilindro, que pesa alrededor de unos 2,5 kilogramos. Para denominarse Roquefort, todos los quesos deben llevarse en los primeros ocho días de su elaboración a una de las cuevas naturales del pueblo de Roquefort, donde madurarán durante tres o cuatro meses.

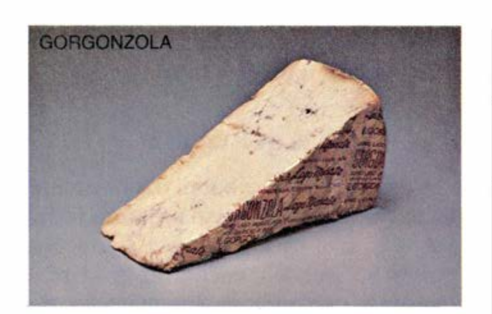
El hongo azul *P. roqueforti*, responsable de la maduración de este queso, necesita menos aire que el hongo blanco *P. caseicolum*; es también más duro. Aunque existen muchas estirpes de *P. roqueforti*, sólo se utilizan cinco o seis para la maduración del queso Roquefort. Todas ellas se han aislado de la atmósfera de las cuevas mediante un proceso de selección natural que se viene utilizando desde hace siglos.

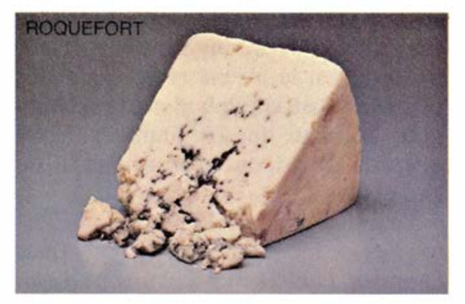
Las esporas de los hongos azules se aplican a la leche o a la cuajada en forma de un polvo negro. Permanecen en estado latente en el queso prensado, hasta que el dióxido de carbono de las grietas naturales del queso, o de los canales practicados insertando vástagos de acero, se sustituye por aire. A veces, junto con los cultivos lácticos ácidos normales, se introducen bacterias formadoras de gas, del género *Leuconostoc*, para originar las oquedades deseadas. En el queso azul, mantenido a 10 grados C y a humedades relativas altas, las esporas de los mohos germinan en unos 30 días desarrollando micelios (filamentos) azul-verdosos que contienen enzimas proteolíticas y lipolíticas muy activas. Estas enzimas funcionan al unísono con las que se encuentran normalmente en el interior del queso, y desarrollan su típico aroma en unos tres o seis meses.

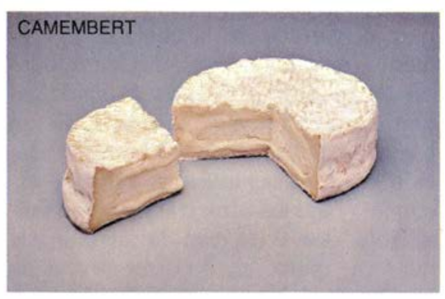
Tres quesos blandos

El Limburger es uno de los varios quesos rojizos madurados por bacterias superficiales; entre los demás están el Brick, Liederkranz, Saint Paulin y Pont l'Évêque. Los estadios iniciales de maduración se caracterizan por el crecimiento, en la superficie del queso, de levaduras salvajes (como las del género *Pichia*). Sus enzimas hacen que la masa pierda acidez, al aumentar el *p*H hasta aproximadamente 5,5, condición que favorece el crecimiento de *Bacterium linens*.

María Harel, en 1791, fue la primera en elaborar queso Camembert, en el









QUESO	LECHE	METODO DE MADURACION
QUESOS SEMIBLANDOS		
BRICK	VACA	CURADO SUPERFICIALMENTE CON *BACTERIUM LINENS* DURANTE 14 DIAS, ENVUELTO Y ALMACENADO DE 2 A 3 MESES A 5 °C.
GORGONZOLA	VACA	MADURADO CON *P. ROQUEFORTI*, CURADO A 5-10 °C Y 80 % DE HUMEDAD RELATIVA DURANTE 30 DIAS. DESPUES A HUMEDADES MAYORES DE 3 A 6 MESES.
MONTEREY	VACA	CURADO DURANTE 6 SEMANAS O MAS A 15 °C y 80 % DE HUMEDAD RELATIVA.
MÜNSTER	VACA	CURADO DURANTE VARIAS SEMANAS A 10-12 °C Y 80 % DE HUMEDAD RELATIVA.
ROQUEFORT	OVEJA	MADURADO CON *P. ROQUEFORTI*, SALADO Y ALMACENADO EN CUEVAS EN ROQUEFORT. MANTENIDO A BAJA TEMPERATURA Y HUMEDAD RELATIVA ALTA DE 3 A 6 MESES.
QUESOS BLANDOS		
BRIE	VACA	ENMOHECIDO POR *P. CANDIDUM* DE 8 A 11 DIAS EN BODEGAS O CUEVAS, A 12 °C Y UNA HUMEDAD RELATIVA DEL 90 %. DISTRIBUIDO, EN REFRIGERACION, LOS PRIMEROS 14 DIAS.
CAMEMBERT	VACA	MADURADO CON *P. CANDIDUM* EN ESTANTES A 14 °C Y UNA HUMEDAD RELATIVA EN TORNO AL 95 % DURANTE 12 DIAS. DISTRIBUIDO EN REFRIGERACION LOS PRIMEROS 21 DIAS.
LIEDERKRANZ	VACA	MADURADO CON *B. LINENS* DURANTE 3-4 SEMANAS A 8 °C.
LIMBURGER	VACA	MADURADO EN LA SUPERFICIE CON *B. LINENS* Y CURADO EN ESTANTES DURANTE TRES SEMANAS, A UNOS 12 °C y 95 % DE HUMEDAD RELATIVA.

rados forman uno de los dos grupos principales de quesos; el otro lo constituyen los quesos frescos. Este último grupo incluye: requesón, queso cremoso, ricotta y mozzarella. Los quesos frescos no se curan; se consumen de inmediato. (En *Ciencia y sociedad* se ofrece otro cuadro de quesos españoles.)

pequeño pueblo francés de ese nombre. Desde entonces, su fabricación se ha extendido a otras regiones de Francia. De acuerdo con una vieja tradición, el queso se hacía con leche cruda, pero se tiende modernamente al empleo de la pasterizada. El queso Camembert se presenta ordinariamente en piezas cilíndricas chatas de unos 228 gramos.

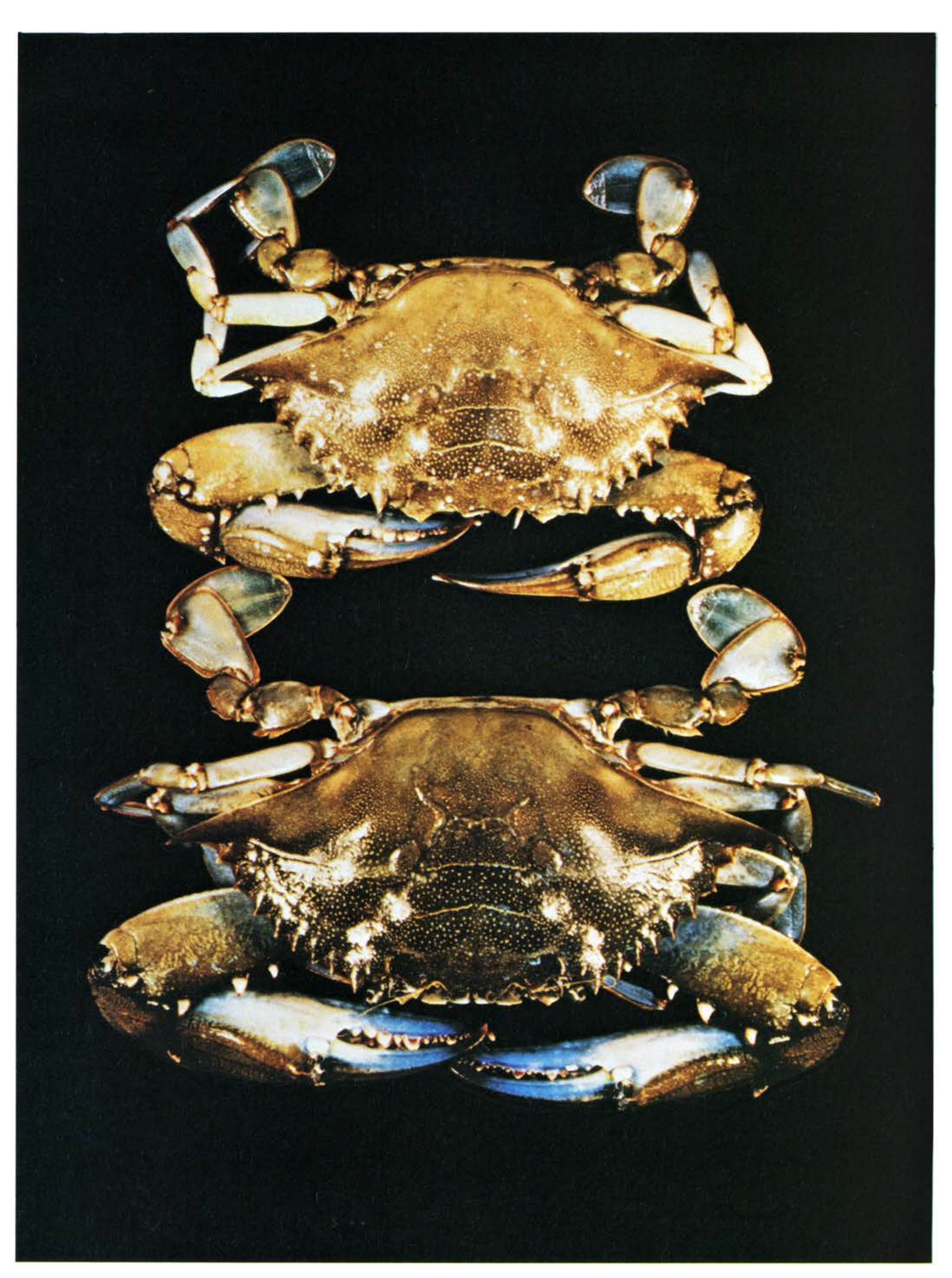
El proceso de elaboración del Brie es similar. Ambos quesos requieren la inoculación de *P. caseicolum*, debido a su micelio blanco. El Camembert y el Brie maduran en sentido centrípeto, de la superficie al centro. El fabricante debe tener la precaución de comenzar con piezas cilíndricas no demasiado gruesas, pues, de lo contrario, las regiones externas maduran en demasía antes de que el centro se vuelva blando. Además, las regiones externas desarrollan un *p*H mayor, lo que significa que, con el tiempo, desprenderán amoníaco, dando lugar a decoloraciones antes de que madure todo el queso.

Más que un arte

Como el lector se habrá dado cuenta, la elaboración del queso requiere todavía más arte que técnica. En muchos países se pueden encontrar maestros queseros que utilizan los métodos de sus antecesores, empleando herramientas y dispositivos muy sencillos, mientras que, en la misma región, grandes plantas industriales pueden producir en gran cantidad quesos similares, igual que una panadería fabrica hogazas de pan en serie.

La mayor parte del queso es producto de la moderna tecnología; tinas enormes, tamices moleculares de membrana, cintas transportadoras continuas para el cortado de la cuajada, instrumentos de salado electrónicos, cortadoras de bloques y prensas de vacío actúan conjuntamente para elaborar un queso de elevada calidad. La fermentación esencial acidoláctica subyace escondida bajo las cubiertas de acero inoxidable que encierran la maquinaria quesera, pero el fundamento sigue siendo el mismo que el de las calderas de cobre y el de las tinas de 1000 litros de las queserías rurales.

En el otro extremo del espectro, hay en los Estados Unidos un número creciente de personas que elaboran su propio queso. Resultado de ello ha sido la formación reciente de la Sociedad Americana del Queso; sus miembros adquieren experiencia elaborando Monterey Jack, Cheddar, Brie y otras variedades.



1. CANGREJO AZUL inmediatamente después de la muda (*abajo*), mostrado bajo el exoesqueleto, o caparazón duro, que acaba de perder (*arriba*). El cangrejo ha absorbido agua y es un 25 por ciento mayor que el antiguo caparazón. El exoesqueleto calcificado no aumenta de tamaño, por lo que debe mudarse periódicamente a medida que el cangrejo crece. El cangrejo azul toma su nombre del color de las patas y de la superficie interna de las pinzas.

La muda del cangrejo azul

El cangrejo azul pierde periódicamente su caparazón y forma otro nuevo, lo que nos brinda un manjar veraniego exquisito: cangrejos de caparazón blando. Se empieza a desentrañar la química que subyace a este proceso de formación

James N. Cameron

Algunas de las recetas culinarias norteamericanas más sabrosas comienzan con la siguiente instrucción: "Tómese una docena de cangrejos de caparazón blando...". Se refieren al cangrejo azul, un crustáceo muy conocido en los Estados Unidos. Prescriban cocer prolongadamente los cangrejos en una salsa ligera o simplemente freirlos, el resultado es un plato delicioso que se asocia a los recuerdos agradables de principios de verano. Se trata de un plato típico de la costa oriental de Norteamérica, aunque el gusto por el mismo se ha ido extendiendo a otras partes de esa nación, e incluso a otros países. La aparición de cangrejos de caparazón blando en las lonjas de pescado a principios de verano guarda relación con un complejo ciclo biológico, en el que se combinan elementos de historia natural, fisiología, ecología y pesca comercial.

El cangrejo azul, *Callinectes sapidus*, tiene el caparazón blando en una sola fase de su vida: inmediatamente después de haber perdido el viejo y antes de que el nuevo comience a endurecerse. La muda y la reconstitución periódicas forman un ciclo que perdura a lo largo de toda la vida del cangrejo. Mi interés científico se centra en los procesos químicos que intervienen en la formación del caparazón. El cangrejo azul adulto mide unos 7,5 centímetros de longitud y unos 15 de anchura. La parte superior del caparazón suele ser verde; la inferior tiene un tono blanquecino. Se le llama azul por la coloración de sus cinco pares de patas. Los tres pares medios son patas marchadoras; las dos patas anteriores terminan en pinzas. Las patas posteriores, aplanadas en sus extremos distales, las usa para nadar; el azul es uno de los cangrejos que mejor nada.

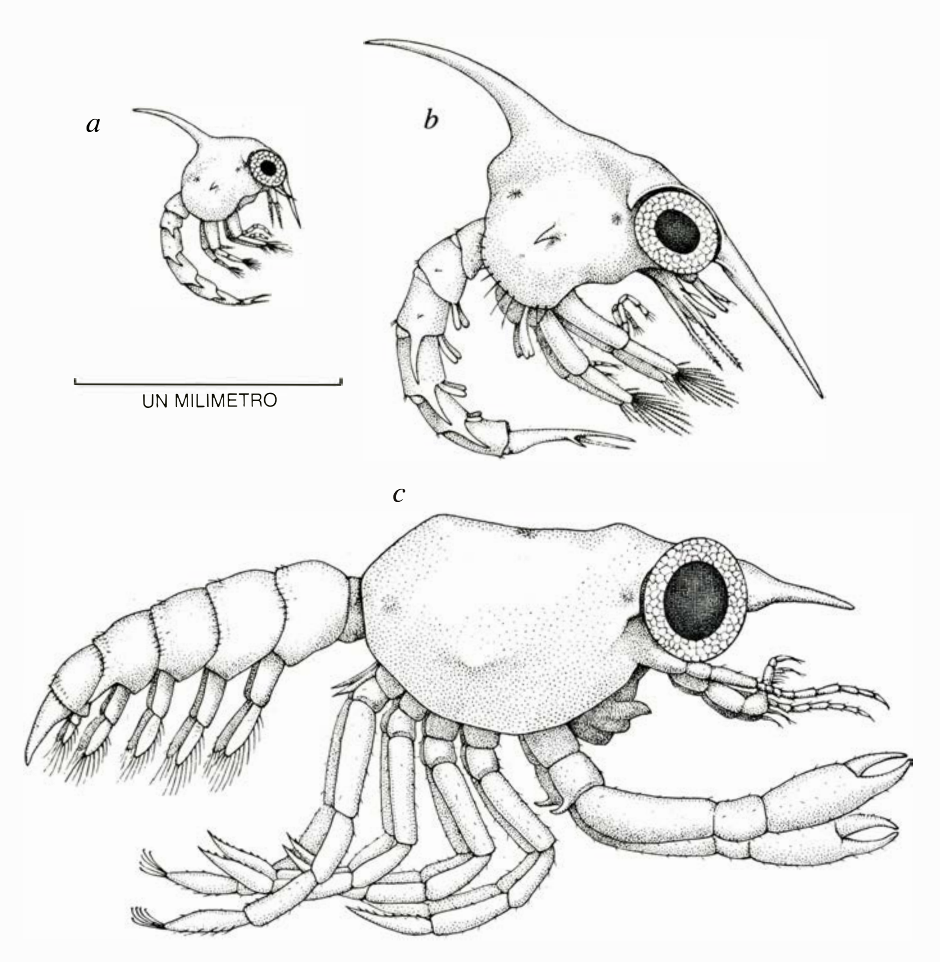
El principal hábitat de nuestro crustáceo es la costa atlántica americana, desde el cabo Cod hasta el Brasil. Sin embargo, su área de distribución se extiende hasta la costa del golfo de México (Louisiana y Texas) e incluso hasta el litoral mediterráneo. En todos esos lugares atraviesa las fases de su ciclo biológico en las aguas someras de estuarios y costas fangosas. En la bahía de Chesapeake, donde radica la industria estadounidense de cangrejo azul, estos crustáceos se ven favorecidos por la densa vegetación de fanerógamas acuáticas. Hierbas emergentes (que salen del agua) forman extensas marismas a lo largo de la línea de costa. En las aguas someras crecen campos de hierbas acuáticas sumergidas. Juntas, las fanerógamas acuáticas de las marismas y de los sebadales forman el nivel inferior de la pirámide ecológica que sostiene a los cangrejos. Entre dichas fanerógamas los cangrejos adultos se alimentan de una gran variedad de peces, moluscos, cangrejos y otros organismos.

El agua de cualquier marisma costera sufre amplias variaciones de temperatura y salinidad, en particular si la marisma se halla en un estuario o en una laguna. Por ello, las hembras del cangrejo azul suelen desplazarse hasta la entrada de la bahía o hasta las aguas oceánicas cercanas a la costa para liberar sus huevos. Del huevo recién eclosionado emerge el primero de los estadios larvarios del cangrejo: la zoea. Se trata de una forma microscópica, más parecida al camarón que a un cangrejo azul adulto [*véase la figura 2*]. La eclosión suele producirse en junio o agosto, aunque el calendario de acontecimientos del ciclo biológico del cangrejo azul varía considerablemente, atendiendo a la temperatura del agua, salinidad y región. Fuera ya del huevo, la zoea flota a merced de corrientes y mareas al tiempo que experimenta una complicada metamorfosis. Por lo general se distinguen siete estadios zoea (a veces hasta un octavo), y entre un estadio y otro la larva muda: se desprende de su recubrimiento externo y forma otro nuevo. En cada muda se advierte un ligero incremento de tamaño y un sutil cambio de forma. Estas mudas tempranas, en las que cambian tanto el tamaño como la forma, se denominan mudas metamórficas.

El proceso de muda, que se reproduce a lo largo de toda la vida del cangrejo, es una acomodación evolutiva al aumento de tamaño que acompaña a la maduración. Al igual que los demás miembros del gran tipo de los Artrópodos, el cangrejo posee exoesqueleto, o esqueleto externo duro; éste ofrece varias ventajas, entre ellas una mayor protección para los órganos internos y un excelente sistema de apalancamiento para algunos sistemas musculares. Sin embargo, a diferencia de los huesos de los mamíferos, el exoesqueleto no crece siguiendo el ritmo del cangrejo. De verse obligado a conservar de por vida el caparazón, no superaría su estadio microscópico de zoea. La muda constituye una solución al problema, solución que se observa igualmente en la mayoría de artrópodos.

Al final del período de zoea la larva del cangrejo muda de nuevo, pero no resulta de ella otra zoea: la muda metamórfica produce una forma conocida como megalopa, dotada de ojos pedunculados (al igual que el cangrejo adulto), tres pares de patas marchadoras y unas toscas pinzas; de ahí que se parezca a un cangrejo azul más de lo que se le parece la zoea, aun cuando la semejanza sigue siendo pequeña. Al cabo de unas dos semanas, una última muda metamórfica lleva la megalopa al estadio de "primer cangrejo". Es éste un cangrejo azul en miniatura, idéntico al adulto en todos los aspectos, salvo en su tamaño y madurez sexual. En condiciones normales, el período que va desde la eclosión hasta la aparición del primer cangrejo es de unos dos meses.

A partir de la transformación en pri-



2. ESTADIOS LARVARIOS del cangrejo azul: la zoea y la megalopa. Cuando el huevo hace eclosión, emerge de él la primea zoea (*a*), que muda seis veces en seis semanas, aumenta de tamaño y se desarrolla en estructura hasta alcanzar el estadio séptimo (*b*). Otra muda transforma la zoea en megalopa (*c*). Al igual que el cangrejo adulto, la megalopa posee pinzas y cinco pares de patas. Dos semanas después, tras una última muda metamórfica, se produce el "primer cangrejo": un cangrejo azul en miniatura.

mer cangrejo, las sucesivas mudas atraviesan aumentos de tamaño sin producir cambio de forma. Un cangrejo sano llega a vivir unos tres años y muda unas 20 veces. A medida que va madurando, se dilata el intervalo entre una muda y otra; en el segundo o tercer invierno, el intervalo puede ser de varios meses. El ciclo de muda se ha dividido en cinco estadios, designados con las letras *A* a *E*, de acuerdo con los cambios progresivos del exoesqueleto y los tejidos asociados. Los estadios *A* y *B* son las fases de postmuda; el *C*, la fase de intermuda; el *D*, la fase de premuda y, el estadio *E*, la emergencia del crustáceo del caparazón, cuyo término técnico es ecdisis. Esta clara división en cinco fases es algo engañosa. Atendiendo a signos externos, el período de intermuda, *C*, es con mucho el más largo. Sin embargo, la preparación interna para la muda da comienzo antes de que se aprecie ningún signo externo, y la recuperación fisiológica de la muda persiste después de que todos los signos visibles hayan desaparecido. La muda no constituye, por tanto, una interrupción abrupta en la vida del cangrejo, sino el acontecimiento culminante de un proceso continuo de crecimiento.

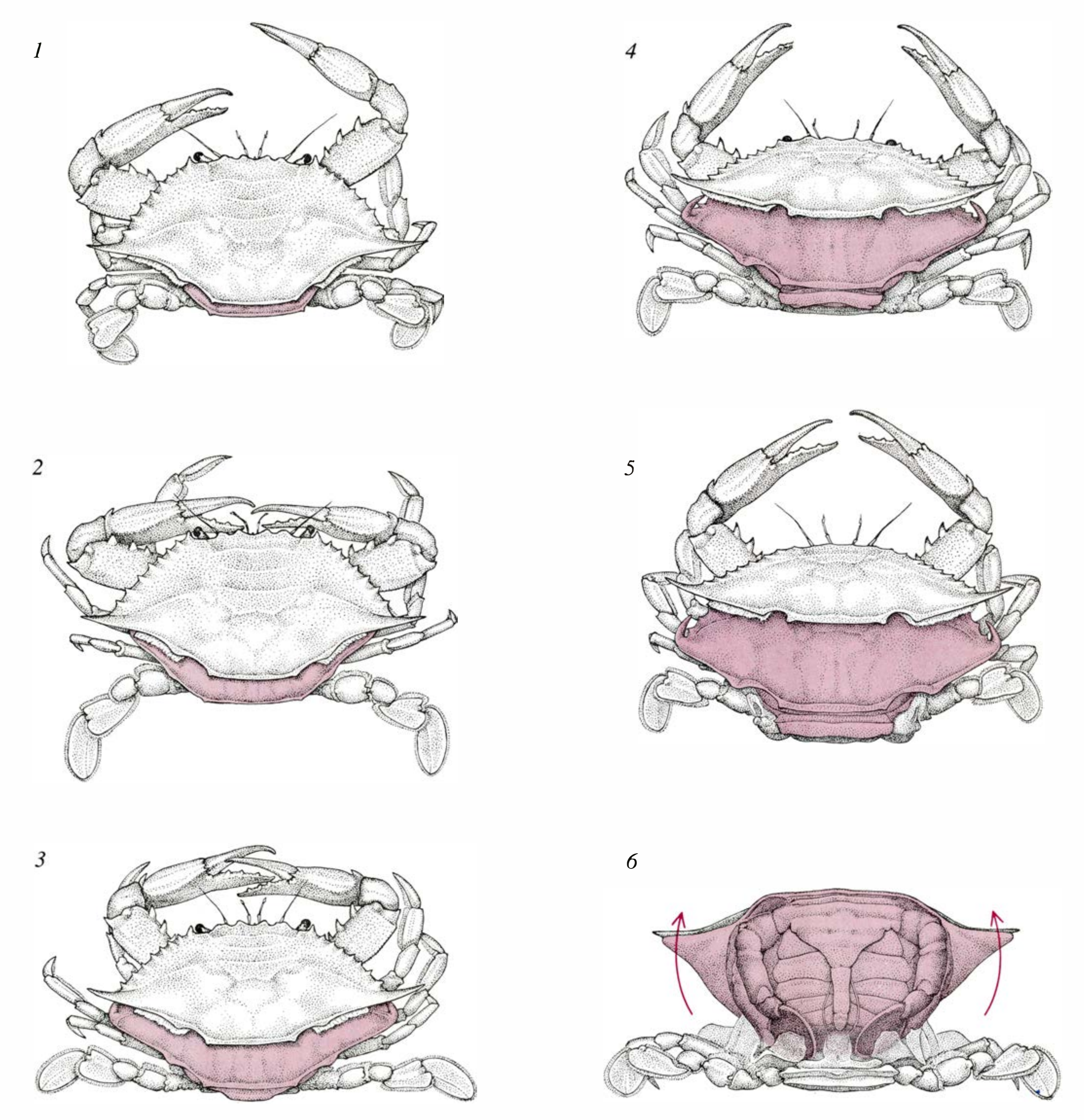
La preparación para la muda se inicia en el estadio *D*, momento en que por acción enzimática se produce la separación de las capas superior e inferior del caparazón y empiezan a disolverse algunas de las partes más duras. Las líneas de sutura, delgadas separaciones que recorren las pinzas y que cruzan la parte anterior del caparazón externo y toda la superficie inferior del caparazón, se disuelven completamente por acción enzimática. Con el avance de la disolución se forma un nuevo caparazón debajo del antiguo. En su mayor parte, el caparazón en formación es invisible. Los segmentos distales de las patas marchadoras y nadadoras son, sin embargo, parcialmente transparentes, y en esos segmentos se distingue el nuevo caparazón como un fino reborde dentro del margen del viejo. El doble reborde permite a los pescadores de la bahía de Chesapeake determinar en qué momento un "pelador" (es decir, un cangrejo a punto de mudar) perderá su exoesqueleto duro. El doble reborde también da pie a otros vistosos nombres, que forman parte de la jerga de los pescadores de cangrejos tiernos. Una o dos semanas antes de la muda, cuando el doble margen es blancuzco e indistinto, se les llama cangrejos de señal blanca. Al aproximarse la muda, el margen se hace muy patente, tomando un color rosa, y finalmente un tono rojo vivo; son, entonces, cangrejos de señal roja. La fase preparatoria final empieza con la absorción de agua por los tejidos, lo que produce un hinchamiento y la ruptura a lo largo de las líneas de sutura debilitadas. Un cangrejo con el caparazón fracturado es un "rompedor".

Al culminar la preparación fisiológica, el viejo caparazón se desprende con bastante rapidez: en el laboratorio hemos visto emergencias de 15 minutos o menos. La separación se consigue en parte debido a la presión hidráulica del agua absorbida. El cangrejo también puede efectuar alguna contracción muscular, y realiza movimientos de bombeo con el estómago en los estadios finales de la muda. Todas las superficies externas se desprenden de una pieza, incluido el revestimiento del estómago (que es una superficie externa, aunque rara vez se la considere tal) y el recubrimiento de las branquias. El cangrejo sale del caparazón viejo hacia atrás y hacia arriba, retirando sus fláccidas pinzas, patas y branquias del viejo exoesqueleto suelto [*véase la figura 3*]. Cuando la muda ha terminado, el cangrejo es blando y está arrugado; el caparazón presenta un color más vivo que en la larga fase de intermuda. Durante las dos horas siguientes, el cangrejo continúa absorbiendo agua, y pronto supera en un 25 por ciento el tamaño del viejo exoesqueleto.

El cangrejo que acaba de mudar en el estadio *A* es el manjar de *gourmet* que se sirve en los restaurantes hacia finales de primavera. El estadio *A* es breve. El exoesqueleto se endurece rápidamente. El proceso empieza con las partes más importantes, como las estructuras bucales que bombean agua sobre las branquias. A las pocas horas el cangrejo ha llegado al estadio *B*, el llamado estadio de "caparazón de papel". Por entonces el dorso tiene una textura rugosa y el cangrejo ha bajado en su cotización comercial. Dada la brevedad del período óptimo para el envío de cangrejos blandos, los pescadores de las costas atlánticas y del Golfo son, por necesidad, buenos ob-

servadores del ciclo de muda. Saben que, a medida que se acerca ésta, los peladores se desplazan desde sus zonas de alimentación normales hacia praderas someras de fanerógamas marinas, cerca de la costa. La razón de este desplazamiento reside en su indefensión; los cangrejos que acaban de mudar son muy vulnerables a los depredadores, entre los cuales figuran otros cangrejos, y las densas matas de fanerógamas ofrecen lugares excelentes donde esconderse. Los peladores se recolectan de sus escondrijos entre las largas hierbas marinas en potes o con artilugios parecidos a rastras que se llaman rascadores. Una vez extraídos los peladores de sus escondrijos se les mantiene en "balsas de peladores", grandes contenedores flotantes y anclados cerca de la costa. El encargado de la balsa observa cuidadosamente los cientos de cangrejos que hay en ella, a la espera del momento de la muda. Inmediatamente después de ésta, el cangrejo, ahora blando, se pesca y se envía en un contenedor refrigerado a un mayorista, y de ahí a la mesa.

Para los cangrejos que escapan de este viaje al plato, la culminación de la



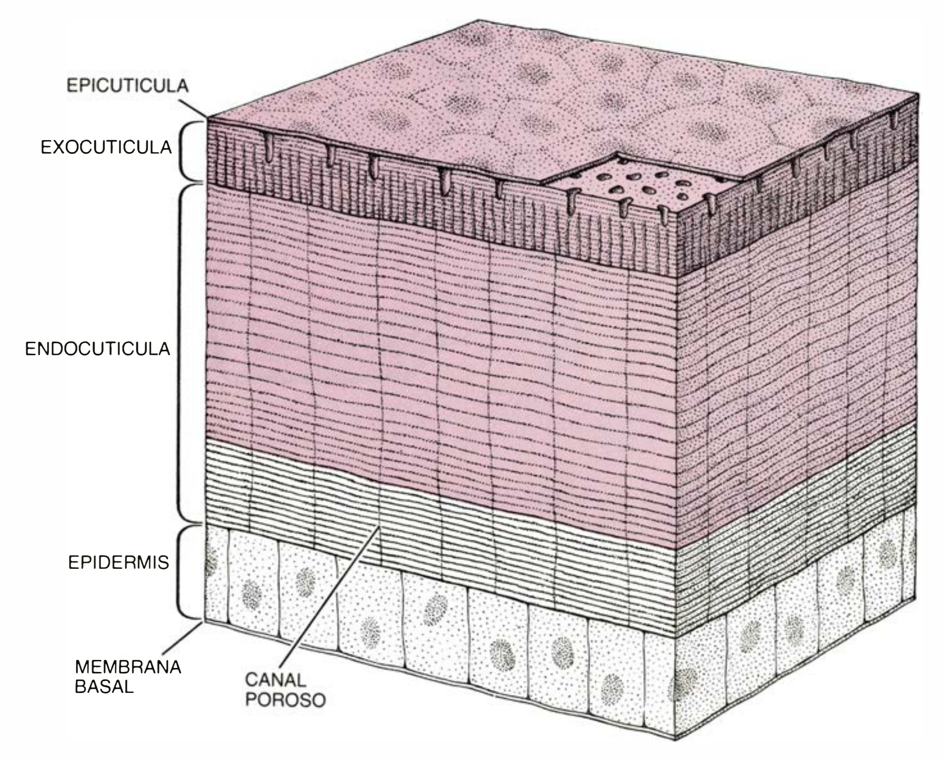
3. MUDA de un cangrejo azul adulto, ilustrada en dibujos basados en fotografías tomadas en períodos de unos 20 minutos en el laboratorio del autor. La muda se inicia con la ruptura de líneas de sutura alrededor del viejo caparazón. La parte superior de éste empieza a levantarse, dejando ver el nuevo (*color*) debajo (*1-5*). Tras la muda de la superficie superior, el cangrejo levanta el cuerpo hacia arriba y hacia atrás en una maniobra que se parece a un salto gimnástico hacia atrás (*6*). A continuación se zafa de las viejas envolturas de las patas, de las branquias y del revestimiento del estómago.

muda constituye, simplemente, un estadio del ciclo biológico. El estadio *B* de postmuda pasa rápidamente al estadio *C*, de intermuda, en el que el caparazón es duro. La duración del estadio *B* depende del tamaño del cangrejo. En los ejemplares grandes el proceso de endurecimiento dura al menos 10 días, y probablemente no finalice en dos semanas. Durante el período de intermuda, en el que no se registran cambios visibles, se reponen las reservas orgánicas precisas para la siguiente muda. También en el transcurso de ese estadio de intermuda tiene lugar la mayor parte del crecimiento hístico. Inmediatamente después de la muda, dentro del caparazón hay más fluido que carne. Hacia el final del período de intermuda, con el caparazón repleto de tejido muscular, el cangrejo ha ganado en peso.

El ciclo continuo de muda tiene un final para cada cangrejo. Para la hembra, la muda final señala el inicio de la disposición para la reproducción. La hembra puede aparearse únicamente después de la muda final, que se denomina muda nupcial. La cópula sólo puede tener lugar inmediatamente después de la muda, mientras el caparazón de la hembra es todavía bastante blando. Al ser muy corto el período de receptividad, la pareja en cópula debe entrar en contacto antes de que la hembra mude. Sigue constituyendo un misterio la forma en que se alerta el macho, pero es probable que en ello intervengan feromonas. Tras el encuentro de la pareja, el macho transporta a la hembra bajo él, ceñida mediante alguna de sus patas marchadoras. La pareja así unida, a la que se conoce con el nombre de "dobles", se esconde entre la hierba, hasta una semana entera, a la espera de la muda nupcial. Después de aparearse permanecen unidos hasta que el caparazón de la hembra se endurece. El apareamiento suele darse en otoño y el esperma se almacena en el cuerpo de la hembra hasta la primavera siguiente, momento en que se libera una masa de huevos fecundados y de éstos eclosionan minúsculas zoeas.

De modo que la historia natural del cangrejo azul comprende dos ciclos superpuestos: el ciclo largo del crecimiento y la reproducción, que se extiende desde la zoea hasta los dobles, y el ciclo de muda, más breve, que se repite muchas veces en la vida de cada cangrejo, y que sustenta la aparición de cangrejos blandos en el menú a principios de verano. Mis investigaciones se han centrado en los sutiles cambios fisiológicos del exoesqueleto y otros sistemas que acompañan al más breve de esos dos ciclos. El exoesqueleto no es ningún tipo especial de tejido. Trátase de un epitelio, o piel, que se ha endurecido por la adición de sales inorgánicas de varios minerales. La principal sal mineral es el carbonato de calcio ($CaCO_3$), pero también contiene pequeñas cantidades de otros minerales, verbigracia, magnesio, estroncio y fosfato.

La epidermis endurecida, o capa externa de la piel, se divide en varias capas horizontales, denominadas, colectivamente, cutícula. La delgada epicutícula, o capa externa, contiene ceras que reducen la permeabilidad del caparazón y proporcionan cierta protección frente a los ataques bacterianos. La epicutícula contiene asimismo proteínas que se curten por la acción de sustancias secretadas por el cangrejo. El curtido une las moléculas proteicas, haciendo que la epicutícula sea dura y coriácea. Bajo la epicutícula quedan dos capas más gruesas, la exocutícula y la endocutícula. Ambas contienen proteínas y quitina. La quitina es un polímero natural con propiedades que se parecen a las de los plásticos. En muchos invertebrados, insectos incluidos, las proteínas y la quitina proporcionan toda la resistencia estructural del exoesqueleto. Sin embargo, en el cangrejo, la deposición de sales minerales añade una resistencia y rigidez considerables.

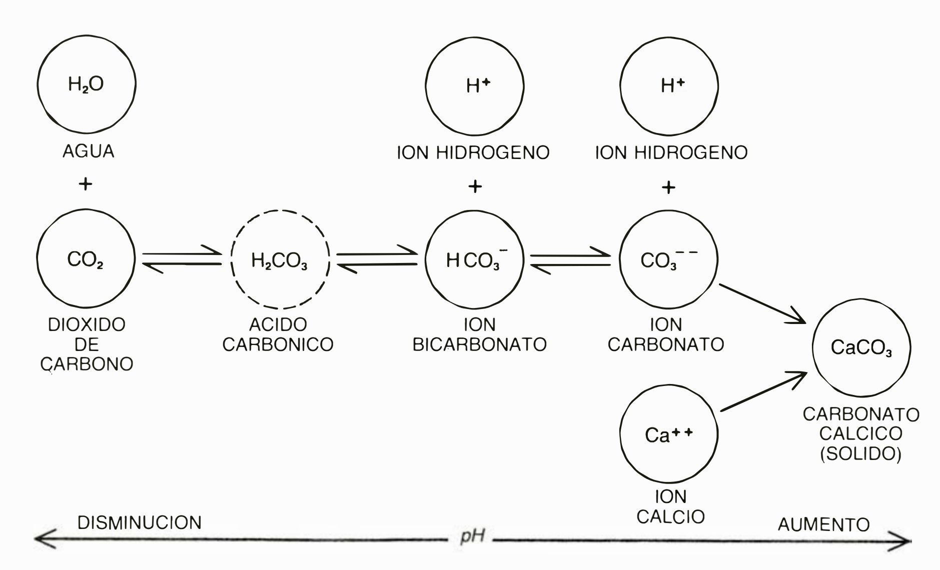


4. CUTICULA DEL CANGREJO AZUL; constituye la parte externa de la piel, que se mantiene rígida por deposición de sales minerales. La epicutícula contiene proteínas y ceras. La disposición en capas de la exocutícula y la endocutícula se debe en parte a la presencia de proteínas y quitina. (La quitina es un polisacárido resistente que también se encuentra en el caparazón externo de los insectos.) Estos materiales proporcionan un molde orgánico para la deposición de las sales minerales, de las que la más abundante es el carbonato cálcico. Justo antes de la muda, la parte superior de la cutícula (*color*) se separa de la parte inferior. Las estructuras orgánicas de la cutícula se formarán de nuevo más tarde en preparación para la deposición de carbonato cálcico. Las células de la epidermis producen un ambiente químico que desempeña un papel clave en el proceso de endurecimiento. Se desconoce la función de los canales porosos.

Las investigaciones realizadas en mi laboratorio empezaron con un estudio de cómo regula el cangrejo azul su acidez interna. Acidez y alcalinidad (o basicidad) se suelen expresar en términos de pH, es decir, del logaritmo negativo de la concentración de iones hidrógeno (H^+). Un pH bajo corresponde a una solución ácida, un pH alto a una solución básica. El nivel de acidez tiene un poderoso efecto sobre las reacciones químicas que subyacen a la formación del caparazón del cangrejo. Chris M. Wood, de la Universidad McMaster, Ontario, y el autor encontraron que el 14 por ciento de los fluidos corporales del cangrejo se contenía en el exoesqueleto, y que en éste el fluido es mucho más alcalino que los demás fluidos corporales. También se observó que, al mudar, el cangrejo retenía pocas sales minerales de la vieja cutícula. Estas dos observaciones les llevaron a preguntarse de qué modo se reconstituyen las sales minerales después de la muda y qué importancia

tiene el fluido alcalino de la cutícula en ese proceso.

El carbonato cálcico ($CaCO_3$), la principal sal mineral de la cutícula, se mantiene en un delicado equilibrio cuando se halla disuelto en soluciones tales como los fluidos internos del cangrejo y el agua de mar. El equilibrio se altera fácilmente por fluctuaciones del *p*H. Un ligero descenso del *p*H provoca la disolución de la sal en sus componentes: el ion calcio (Ca^{++}) y el ion carbonato (CO_3^{--}). Un ligero aumento del *p*H, por el contrario, produce la formación de carbonato cálcico. Los iones bicarbonato (HCO_3^-) se disocian en iones carbonato e iones hidrógeno (H^+). Cada ion carbonato se une con un ion de calcio, y la sal sólida, $CaCO_3$, precipita abandonando la solución. Es evidente que la alcalinidad del fluido del exoesqueleto favorece la precipitación de la sal mineral sólida.



5. LA FORMACION DEL CARBONATO CALCICO depende en gran medida del *p*H (el logaritmo negativo de la concentración de iones hidrógeno) que tenga una solución. El *p*H es una medida de la acidez o alcalinidad (basicidad); un *p*H alto corresponde a una solución alcalina; un *p*H bajo, a una solución ácida. A medida que el *p*H aumenta, el agua y el dióxido de carbono se combinan para formar pequeñas cantidades de ácido carbónico. En su mayor parte, el ácido carbónico se disocia en iones bicarbonato e iones hidrógeno. Los iones bicarbonato se disocian a su vez en iones carbonato e iones hidrógeno. Los iones carbonato pueden reaccionar con iones calcio para formar carbonato cálcico que, en su mayor parte, deja de estar en solución y precipita en forma de depósito sólido, que endurece la cutícula del cangrejo azul. Si el *p*H de la solución desciende, la cadena de reacciones se produce en sentido contrario.

Las reacciones químicas relacionadas en el exoesqueleto permiten al cangrejo aumentar muy rápidamente el contenido en calcio de la cutícula. En un cangrejo grande, de alrededor de 400 gramos, durante las dos semanas siguientes a la muda se depositan unos 40 gramos de carbonato cálcico, que equivalen en peso a cuatro barritas de tiza. El nuevo carbonato cálcico se forma a partir de los iones calcio (Ca^{++}) y bicarbonato (HCO_3^-) de los fluidos hísticos. Sin embargo, la formación de iones carbonato (CO_3^{--}) a partir de iones bicarbonato, que precede a la deposición de la sal mineral, genera un exceso de iones hidrógeno. Para que el cangrejo mantenga el *p*H interno constante, imprescindible para sobrevivir, los iones hidrógeno deben transportarse del exoesqueleto a la sangre, y de ésta al agua de mar. Además, debe haber rutas de transporte paralelas, en sentido contrario, que aporten iones calcio y bicarbonato.

Para conocer mejor estos procesos sería de ayuda medir las tasas a que los distintos iones fluyen hacia el interior del cangrejo y desde éste al exterior, mientras el caparazón se está calcificando. Sin embargo, surge una dificultad experimental a la hora de medir el intercambio de iones hidrógeno y bicarbonato (HCO_3^-) con el agua de mar. La dificultad guarda relación con el hecho de que la principal fuente de iones bicarbonato para la nueva cutícula es el dióxido de carbono (CO_2). El dióxido de carbono se halla en el agua y también en los tejidos del cangrejo, donde constituye un subproducto del metabolismo. Las moléculas de dióxido de carbono se combinan con moléculas de agua para formar ácido carbónico (H_2CO_3). Cada molécula de ácido carbónico se disocia luego en un ion hidrógeno y un ion bicarbonato.

Sin embargo, estas reacciones pueden producirse en sentido contrario: se unen iones hidrógeno e iones bicarbonato para formar ácido carbónico, que luego se descompone en dióxido de carbono y agua. En el agua de mar (de hecho, en cualquier solución), las proporciones relativas de iones hidrógeno, iones bicarbonato, ácido carbónico y dióxido de carbono tienden hacia un nivel determinado, que se conoce como equilibrio químico. De perturbarse una solución en equilibrio por la adición o sustracción de moléculas de una de las cuatro sustancias, las cantidades de las cuatro cambiarán hasta que se recupere el equilibrio. Así, no cabe distinción entre la adición de un ion hidrógeno y la sustracción de un ion bicarbonato, porque en ambos casos el reequilibrio conducirá al mismo cambio de las concentraciones de cada ion. Sin embargo, sí cabe determinar la suma de todas las especies químicas cuando se alcanza el equilibrio, lo que dará una medida del cambio neto. En reconocimiento de la ambigüedad de la medición, se emplea el término excreción aparente de ion hidrógeno. Medimos la tasa de excreción aparente de ion hidrógeno en cangrejos azules acabados de mudar y encontramos que era muy elevada. Puesto que los iones hidrógeno se excretan como parte del proceso de calcificación de la nueva cutícula, esperábamos que la absorción de calcio también fuera rápida. La medida de la tasa de absorción de calcio mostró que así era.

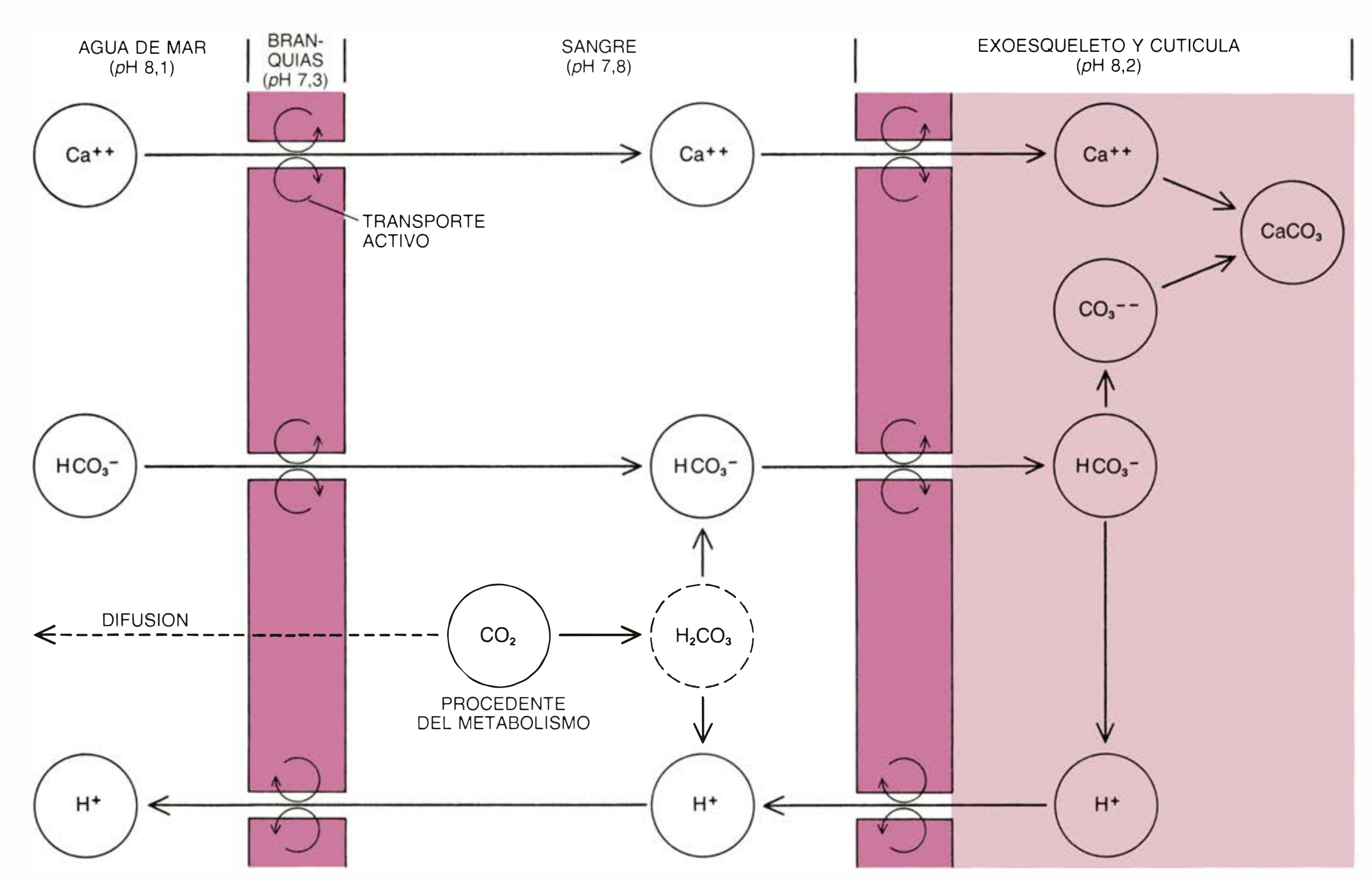
Decidimos entonces descubrir el sistema que transporta los iones calcio, hidrógeno y bicarbonato, precisos para la calcificación. Comenzaron a aclararse los procesos de transporte cuando abordamos el estudio del origen del dióxido de carbono incorporado en el carbonato cálcico; podía proceder del propio metabolismo del cangrejo. Durante el metabolismo ordinario, los animales consumen oxígeno y producen dióxido de carbono en cantidades aproximadamente iguales. Nuestro trabajo demostró que parte del dióxido de carbono podía venir del metabolismo. Sin embargo, los requerimientos de la calcificación superan la capacidad del cangrejo para producir dióxido de carbono. Un cangrejo azul adulto produce alrededor de 1,6 gramos de dióxido de carbono por kilogramo de peso corporal. El exoesqueleto completo contiene unos 44 gramos de dióxido de carbono (incorporado en el carbonato cálcico) por kilogramo. Si para calcificar el nuevo caparazón se utilizara únicamente dióxido de carbono de procedencia metabólica, tomaría cerca de 28 días la mineralización completa del caparazón. La mineralización se logra en mucho menos de 28 días; debe existir, por tanto, una fuente externa de dióxido de carbono que se sume a los procesos metabólicos internos.

La otra fuente de dióxido de carbono es el agua de mar. El dióxido de carbono del medio podría entrar en los tejidos del cangrejo de dos maneras: por difusión directa de dióxido de carbono gaseoso disuelto en el agua y por absorción de iones bicarbonato (HCO_3^-) que, como hemos visto, contiene moléculas de dióxido de carbono. Para que una sustancia se difunda libremente en los tejidos desde el medio, la concentración externa debe ser mayor que la concentración interna. Nuestras mediciones demostraron que no existía tal gradiente que impulsara la difusión de dióxido de carbono hacia el interior del animal: la concentración de dióxido de carbono gaseoso disuelto era mayor en el interior del cangrejo que en el exterior. El dióxido de carbono adicional preciso para la calcificación debía, por tanto, aportarlo la absorción de iones bicarbonato del agua de mar circundante.

Estos hallazgos crean una imagen bastante compleja de los procesos de transporte que se desarrollan en la semana que sigue a la muda [*véase la figura 6*]. Los iones calcio atraviesan las branquias y llegan a la sangre; la circulación los lleva a la superficie interna de la cutícula en formación. Un segundo peldaño del transporte introduce los iones calcio en los fluidos del exoesqueleto, al tiempo que se extraen por bombeo iones hidrógeno del fluido exoesquelético. La eliminación de los iones hidrógeno aumenta el *p*H, con lo que el fluido se alcaliniza y se favorece la formación de iones carbonato y de carbonato cálcico sólido. Se acarrean los iones bicarbonato desde el agua de mar hasta la sangre, y de ésta al exoesqueleto. Los iones hidrógeno que rinde la formación de carbonato cálcico se desplazan en sentido contrario: desde el exoesqueleto hacia la sangre y, finalmente, al agua de mar.

De las investigaciones realizadas hasta ahora cabe deducir que existen tres movimientos iónicos principales: los iones calcio y bicarbonato se desplazan hacia dentro del crustáceo mientras que los iones hidrógeno se mueven hacia afuera. Estamos ahora empeñados en descifrar los detalles del sistema de transporte. Recientemente encontramos que, si bien las tasas de transporte son particularmente sensibles a las variaciones de las concentraciones de calcio y de bicarbonato en el agua de mar, también lo son al gradiente de iones hidrógeno entre el agua de mar y la sangre. Los flujos de iones están ligados, pero su acoplamiento no es estrecho. Si se manipulan las condiciones externas, los movimientos de iones hidrógeno pueden interrumpirse sin bloquear completamente el movimiento de calcio; y viceversa. Todo flujo iónico resulta afectado por los cambios de la composición química de la sangre, pero todavía no se conocen bien esos efectos, pues las condiciones sanguíneas de los animales vivos se prestan a grandes cambios experimentales.

Quedan todavía muchas cuestiones por responder acerca de la fisiología de la muda. Un campo importante para ulteriores estudios lo constituye la relación de los procesos de transporte con el control endocrino global del ciclo de muda. En el período de premuda, la crustecdisona, una hormona esteroide, acelera la proximidad de la muda. La crustecdisona, secretada por el órgano *Y*, una estructura neurosecretora del tórax, la aislaron, en 1966, F. Hamp-



6. SISTEMA DE TRANSPORTE que lleva los iones precisos para formar un nuevo caparazón en el cangrejo azul. Un mecanismo de bombeo activo transporta iones hidrógeno desde la cutícula al agua de mar. La eliminación de iones hidrógeno eleva el *p*H del exoesqueleto y favorece la deposición de carbonato cálcico. Otras bombas introducen iones calcio y bicarbonato del agua de mar en la cutícula. Al *p*H alto de la cutícula los iones bicarbonato dan iones carbonato, que se incorporan al carbonato cálcico. El dióxido de carbono del metabolismo contribuye asimismo a la formación de iones bicarbonato. El dióxido de carbono que no se precisa para formar la nueva cutícula difunde al mar. Un adulto deposita hasta 400 gramos de $CaCO_3$, en dos semanas.

shire y Denis H. S. Horn, de la Organización para la Investigación Científica e Industrial de la Commonwealth en Melbourne, Australia. En el período de intermuda, la producción de crustecdisona la bloquea una hormona inhibidora de la muda (*HIM*) secretada por el órgano *X*, una estructura neurosecretora del pedúnculo ocular. No se ha resuelto aún la composición química de la *HIM*. El órgano *X* parece secretar asimismo otras hormonas, cuyas funciones no se conocen con el suficiente detalle.

A la vista del poderoso influjo de las hormonas en el proceso de la muda, es probable que la calcificación de la nueva cutícula después de la muda se halle bajo alguna forma de regulación hormonal. Sin embargo, cuando inyectamos crustecdisona en cangrejos que acababan de mudar no se apreció ningún cambio en los procesos de transporte de iones. La inyección de extractos de pedúnculo ocular, que contienen varias hormonas del órgano *X*, ejerció asimismo poco efecto. Estos resultados no invalidan la hipótesis de que la mineralización está regulada hormonalmente, sino que implican que la regulación no corre a cargo de la crustecdisona o de hormonas del órgano *X*. Sin embargo, el cerebro y otros tejidos nerviosos del cangrejo azul tienen también una considerable actividad secretora, y probablemente la atención experimental deba dirigirse ahora hacia tales estructuras.

La resolución de los intrigantes rompecabezas que aún plantea el ciclo de muda del cangrejo azul quizá aporte beneficios de índole científica y comercial. La calcificación es un proceso que se da en una gama muy extensa de organismos, por lo que resultaría de gran valor la comprensión total del proceso. El cangrejo acabado de mudar podría servir de modelo experimental de la calcificación, así como para el estudio del transporte de iones y de la regulación del *p*H. En términos prácticos, el control del proceso de muda podría aumentar el valor de la recolección de cangrejos, haciendo más fácil su marisqueo y extendiendo el negocio a nuevas zonas.

La recolección de cangrejos de caparazón blando ha pasado, a partir más o menos de 1860, de constituir una costumbre local típica a convertirse en una importante actividad comercial. Las recetas para cangrejos blandos datan de mucho antes de 1860, pero el envío de un suministro estable de cangrejos blandos a las grandes ciudades de la costa oriental de los Estados Unidos tuvo que aguardar a la llegada de ferrocarriles y buques de vapor rápidos y de la refrigeración mecánica. En cuanto se dispuso de medios para el transporte rápido, la expansión del mercado fue veloz. Aunque las estadísticas no son muy fiables, el valor de los cangrejos de caparazón blando en lonja alcanza en la actualidad varios millones de dólares anuales.

Si bien los cangrejos duros constituyen la mayor parte de la recolección comercial de cangrejos azules, los blandos se cotizan mucho más que aquéllos. Los duros se pagan en lonja a unas 100 pesetas el kilogramo al cambio, mientras que los cangrejos blandos se están pagando en los últimos años a más de 850 pesetas el kilo. Si pudiera controlarse el proceso de muda, la proporción de cangrejos de caparazón blando en la captura aumentaría y el valor total de la misma crecería.

Además, el control comercial de la muda facilitaría enormemente el marisqueo de cangrejos de caparazón blando. La gestión de las balsas de peladores en las que se mantienen los cangrejos en premuda hasta que se desprenden de su viejo caparazón es ardua, exige mucha mano de obra y resulta comercialmente arriesgada. Un método fiable de inducir la muda permitiría que la industria fuera menos laboriosa y ayudaría a expandir la recolección de cangrejos blandos mucho más allá de sus límites actuales. Hoy casi no se practica el marisqueo comercial importante de cangrejos blandos fuera de la región de la bahía de Chesapeake, a pesar de que otras zonas del área de distribución del cangrejo son, en algunos aspectos, más favorables para su captura. Debido al clima más bonancible de Texas, la estación de muda dura en ese estado desde marzo hasta mediados de noviembre, casi dos veces más que en Chesapeake. Si el marisqueo de los cangrejos azules resultara más fácil, la industria crecería rápidamente, reduciendo el precio y extendiendo el gusto por los cangrejos blandos a nuevos paladares.

Puesto que los incentivos son importantes, quizá se encuentre pronto un desencadenador de la muda barato y fiable. Sin embargo, de momento, la muda del cangrejo azul debe considerarse un estadio de un proceso continuo de crecimiento. Además, quizás el sabor de un cangrejo de caparazón blando regado con un vino blanco fino lo enriquezca la constatación de que tal exquisitez sólo está disponible cuando la naturaleza la ofrece.

Cristales a altas presiones

Estudios de rayos X de cristales comprimidos entre un par de diamantes sin mácula revelan una serie de respuestas al aumento de la presión. Los cambios en la estructura atómica se visualizan mejor en el marco de la geometría poliédrica

Robert M. Hazen y Larry W. Finger

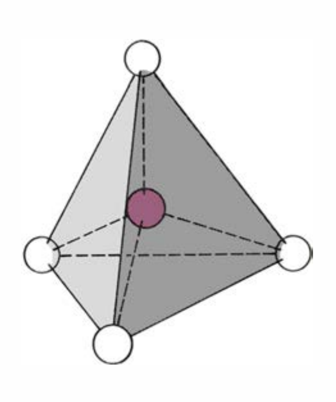
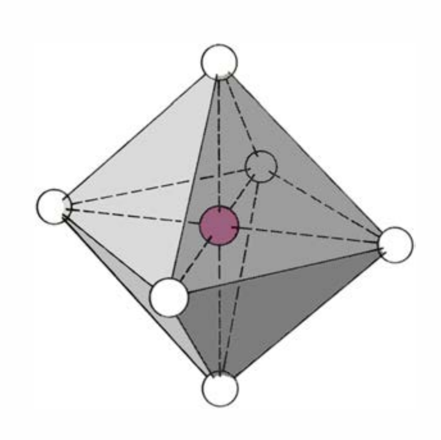
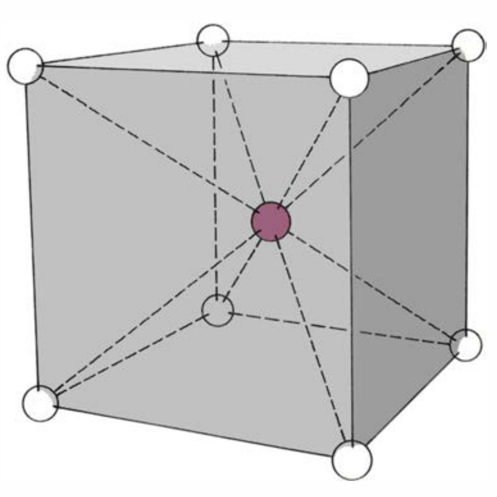
¿Qué le sucede a la estructura atómica de un cristal cuando aumenta la presión externa? En un sentido amplio, la respuesta es obvia: los átomos se aproximan unos a otros, menguando el volumen del cristal. Sin embargo, hasta hace contados años los investigadores no habían comenzado a analizar con detalle las diversas formas en que la compresión afecta a las disposiciones particulares de los átomos. Este mejor conocimiento ha resultado de la conjunción de dos herramientas experimentales. Una de ellas, la celdilla de yunques de diamante para producir altas presiones, es una incorporación bastante reciente en el laboratorio; la otra, el difractómetro de rayos X, ha sido una pieza fundamental de la investigación cristalográfica durante décadas.

La llegada de la celdilla de yunques de diamante permitió alcanzar presiones altísimas con una facilidad sin precedentes. Presiones por encima de los dos millones de atmósferas (equivalentes a las existentes cerca del núcleo terrestre) pueden producirse ahora fácilmente entre dos pequeños diamantes sin mácula, que se comprimen uno contra otro en un dispositivo accionado mecánicamente, similar a un cascanueces [véase "Celdilla de yunques de diamante para producir altas presiones", por A. Jayaraman; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, junio, 1984].

La tremenda presión producida en una celdilla de yunques de diamante puede transmitirse hidrostáticamente (es decir, uniformemente en todas direcciones) a un cristal, sumergiendo éste en un fluido que se encierra entre los diamantes por medio de una junta metálica. Por ser los diamantes transparentes a la radiación X, puede enfocarse sobre el cristal un estrecho haz de rayos X y medirse sus componentes difractadas con un equipo estándar de detección de ese tipo de rayos. Así puede determinarse la disposición de los átomos en un cristal a altas presiones de manera similar a como puede hacerse en un cristal a presión atmosférica.

El conocimiento de las propiedades de la materia a altas presiones es decisivo para la interpretación del interior de la Tierra. En consecuencia, la mayoría de las docenas de compuestos que se han estudiado hasta la fecha, con las nuevas técnicas cristalográficas de altas presiones, han sido minerales. Entre ellos se encuentran óxidos, silicatos, haluros y cristales moleculares sencillos. Estos minerales reducen su volumen en un 50 por ciento o más para presiones comparables a las del manto inferior y núcleo terrestres. ¿Qué cambios en la estructura atómica pueden explicar una pérdida de volumen tan grande? ¿Qué revelan estos cambios sobre la naturaleza de las fuerzas entre los átomos?

El enlace atómico de la mayoría de los minerales que componen las rocas puede describirse por medio de un simple modelo iónico. Los iones metálicos cargados positivamente, llamados cationes, están normalmente rodeados por iones cargados negativamente, llamados aniones. El agrupamiento formado por un catión y los aniones que le rodean suele ser de una forma bastante regular, correspondiendo los aniones

1. AGRUPACIONES GEOMETRICAS REGULARES de aniones, cargados negativamente, rodean a un catión metálico, cargado positivamente, en muchas sustancias cristalinas, entre ellas los minerales comunes que componen las rocas. Los compuestos iónicos de este tipo pueden representarse convenientemente mediante formaciones de poliedros; en el centro de cada poliedro hay un catión y en los vértices están los aniones. La figura ilustra tres estructuras iónicas: tetraedro, octaedro y cubo. En el resto de los diagramas poliédricos que acompañan al artículo se ha optado por omitir los iones.

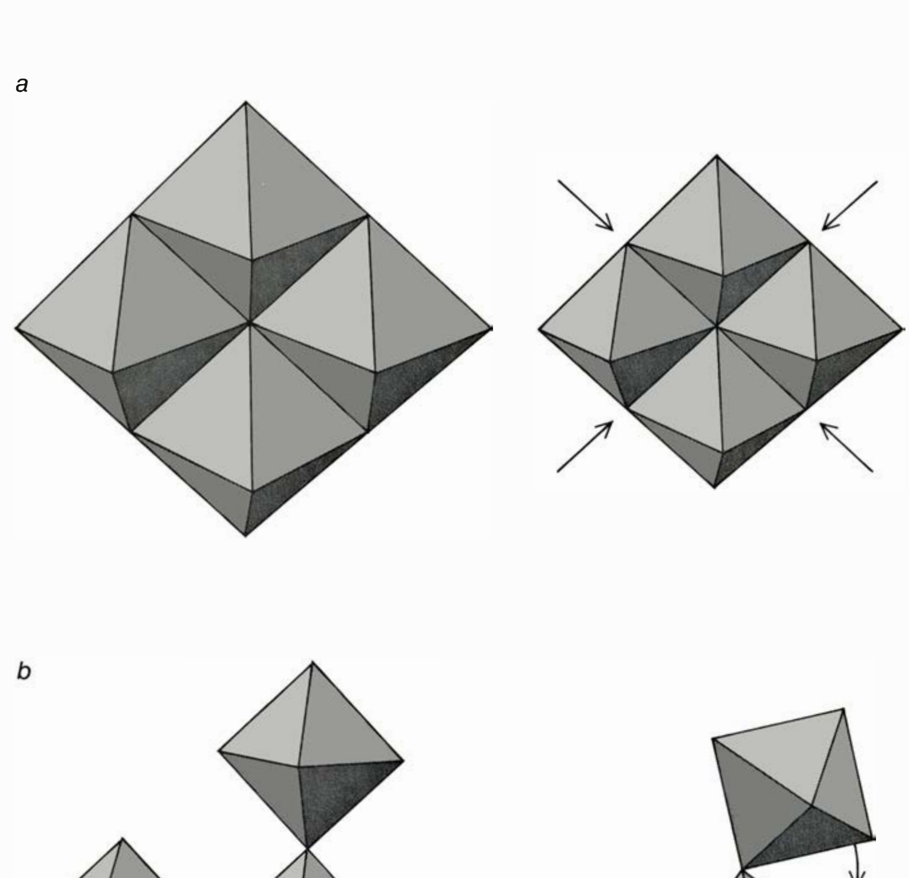
(la mayoría de las veces oxígeno) a los vértices de un tetraedro, un octaedro, un cubo o alguna otra sencilla forma poliédrica [*véase la figura 1*].

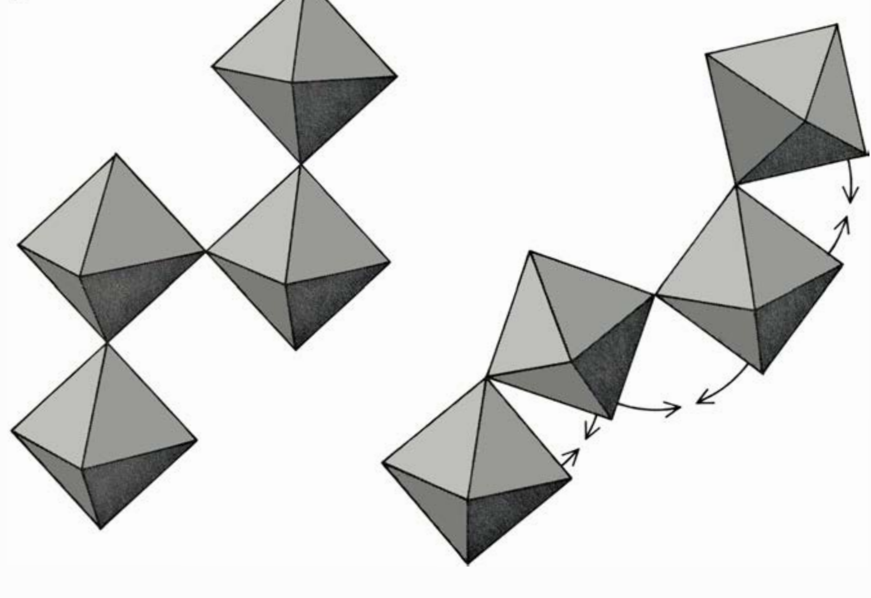
La representación de los agrupamientos iónicos como poliedros con un catión en el centro simplifica la descripción de las estructuras cristalinas complejas. Las disposiciones de muchos átomos diferentes que son difíciles de representar si se muestra cada uno de ellos, se reducen a formas geométricas sencillas. Los compuestos binarios comunes, como los óxidos de un único metal, pueden representarse como el empaquetamiento de un determinado tipo de poliedro. Los silicatos y los óxidos de varios metales pueden tratarse de forma similar, aunque necesitan dos o más tipos de poliedro.

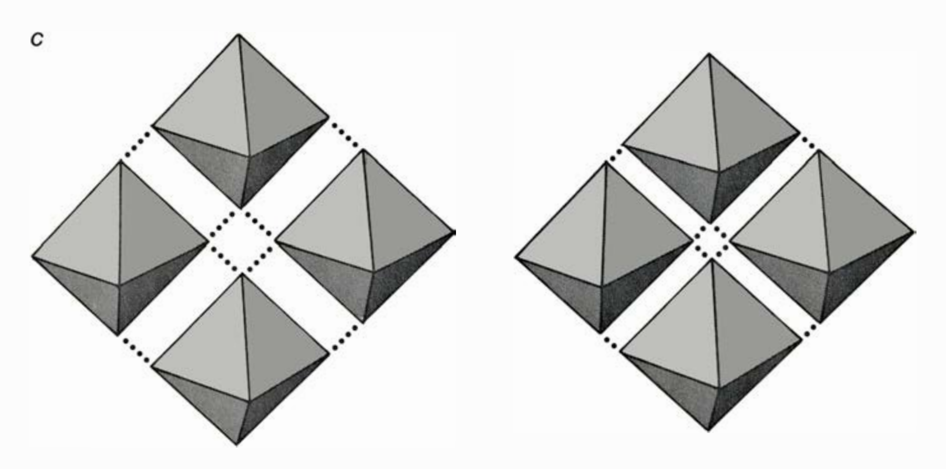
Los poliedros con un catión en el centro son algo más que una simple ayuda visual. Cada tipo de poliedro posee su propio conjunto distintivo de propiedades, que puede ser útil para predecir el comportamiento del volumen del cristal. El reconocimiento de la importancia de estas propiedades características ha conducido a un nuevo método para representar con modelos las diferentes formas de materia sólida. Este método, conocido por método poliédrico, identifica primeramente los poliedros que componen el cristal y sus propiedades, sumándose a continuación estos factores para el volumen del cristal. El procedimiento, a menudo complejo, depende de cómo estén unidos los poliedros. En general, dos poliedros pueden unirse compartiendo un vértice (es decir, un anión común único), una arista (dos aniones comunes) o una cara (tres o más aniones comunes). Además, dos poliedros pueden unirse por fuerzas moleculares débiles, en cuyo caso no se comparten aniones. Las propiedades del volumen del cristal dependen de los tipos de poliedros que lo componen y de la naturaleza de sus uniones.

El método poliédrico se ha revelado especialmente eficaz en el estudio del comportamiento de los cristales sometidos a compresión. Cada tipo de poliedro con un catión en el centro tiene su propio valor de compresibilidad y las relaciones entre las uniones poliédricas y la compresibilidad del cristal son comparativamente inmediatas. Para predecir cómo se comporta un determinado cristal sometido a compresión es necesario entender primero las clases de cambios que puede imponer la presión en una estructura atómica.

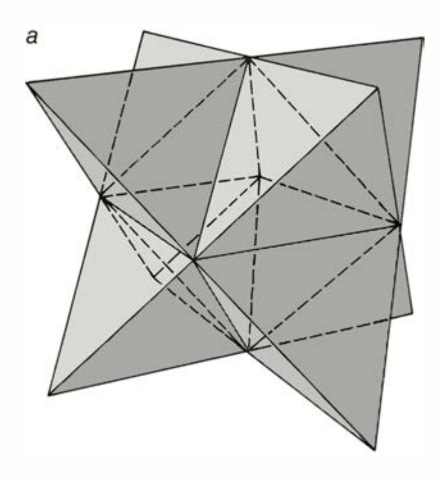
Tres clases de cambios en la geome-

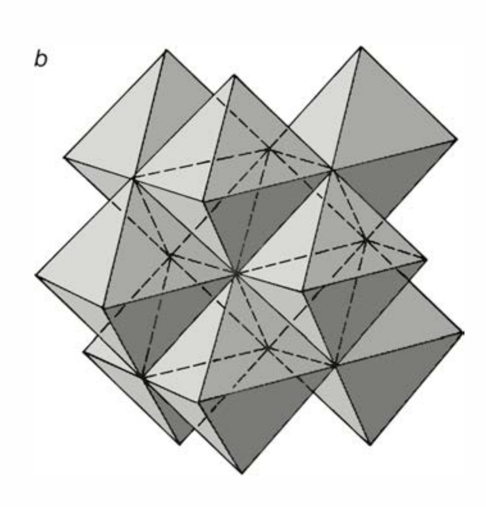


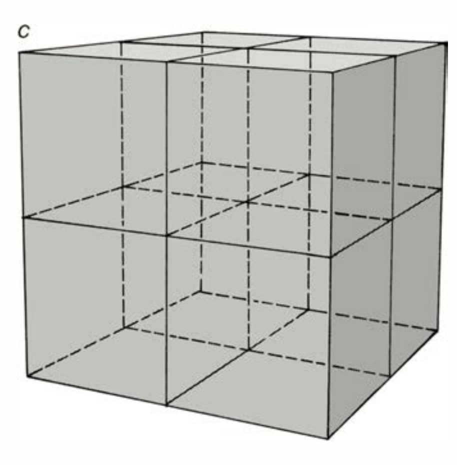




2. TRES POSIBLES RESPUESTAS DE LA ESTRUCTURA DE UN CRISTAL a la compresión se ofrecen en estos diagramas poliédricos de disposiciones atómicas características. El acortamiento de los enlaces (*a*) reduce la distancia media entre los pares de átomos. La flexión del ángulo de enlace (*esquema del centro*) cambia los ángulos entre los enlaces adyacentes, sin alterar significativamente su longitud. La compresión intermolecular (*abajo*) es característica de sólidos que se componen de moléculas discretas que se mantienen juntas por enlaces débiles (*líneas de puntos*). Cada uno de los tres mecanismos mostrados reduce el volumen del cristal total al disminuir la distancia media entre los átomos; sin embargo, la magnitud de los cambios y las posiciones relativas finales de los átomos son diferentes en cada caso.







3. COMPUESTOS BINARIOS SENCILLOS; poseen estructuras que se representan por un único tipo de poliedro con un catión en el centro. La compresibilidad de estos cristales es uniforme en todas las direcciones e idéntica a la compresibilidad de los poliedros individuales. En el óxido de litio (*a*) cada uno de los cationes de litio está rodeado por un tetraedro de aniones de oxígeno. El cloruro de sodio (*b*) está compuesto por una formación de octaedros con sodio en el centro que comparten las aristas. El cloruro de cesio (*c*) consiste en una formación de cubos con caras comunes.

tría estructural explican la mayor parte de la compresión del cristal. El acortamiento de los enlaces, que puede representarse como una compresión poliédrica en los compuestos iónicos, se observa en todas las sustancias sometidas a altas presiones y, por tanto, es siempre responsable al menos en parte de cualquier reducción de volumen. La flexión del ángulo de enlace, en la que las distancias entre los átomos vecinos más próximos cambia sólo ligeramente mientras que los segundos vecinos más próximos se acercan mucho más, predomina en la compresión de los cristales en que los átomos no están densamente empaquetados. La compresión intermolecular es la principal respuesta al aumento de presión en las sustancias moleculares condensadas. Cualquier combinación de estas tres clases de cambio geométrico puede contribuir a la compresión del cristal.

Aunque el acortamiento de los enlaces se observa en todos los cristales comprimidos, su magnitud varía para los diferentes poliedros. Así algunos agrupamientos catión-anión en una estructura determinada pueden considerarse "blandos", en el sentido de que varían significativamente de tamaño según la presión, mientras que otros pueden considerarse "duros", ya que sólo muestran un pequeño cambio de tamaño incluso para presiones de miles de atmósferas.

A pesar del amplio rango de compresibilidades de enlace observadas es destacable que cualquier tipo de poliedro –por ejemplo, un catión de magnesio ligado a seis aniones de oxígeno– presenta casi la misma compresibilidad en todos los cristales. Por tanto puede asignarse a cada poliedro un valor de compresibilidad que es casi constante de una estructura a otra. ¿Qué factores gobiernan las magnitudes relativas de la compresibilidad poliédrica y cómo pueden predecirse estos valores?

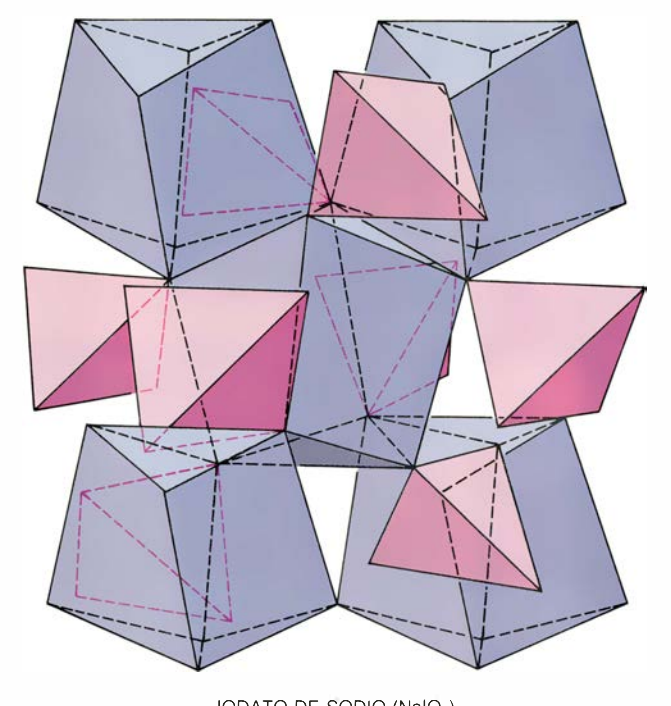
Los enlaces iónicos, que unen cationes y aniones en el agrupamiento poliédrico, pueden definirse por unos parámetros sencillos: longitud del enlace, número de vecinos más próximos de cada ion y carga electrostática del catión y del anión. Linus Pauling, en su monografía clásica *Naturaleza del enlace químico*, relaciona con éxito varias características peculiares de los cristales con estas simples variables. El mismo método se ha tomado para establecer el modelo de la compresión poliédrica.

Se han encontrado dos relaciones empíricas significativas entre los parámetros del enlace y la compresibilidad de un poliedro determinado. En primer lugar la compresibilidad poliédrica tiende a ser proporcional al cubo de la distancia entre los iones y en consecuencia (aproximadamente) al volumen del poliedro. Los poliedros grandes, como los de los cationes alcalinos, son más compresibles que los pequeños, como los cationes de silicio o aluminio. Resulta que los poliedros que representan la mayoría del volumen de un cristal, normalmente contribuyen en mayor medida a la compresión de éste. Además, la compresibilidad del poliedro es inversamente proporcional a la carga de cationes y aniones; por tanto, la distancia entre los pares catión-anión con interacción electrostática más fuerte será menos afectada por la presión. Estas dos relaciones, que se obtuvieron del análisis de cientos de medidas de la compresibilidad de los enlaces, facilitan la predicción de las compresibilidades poliédricas y de los enlaces en óxidos y silicatos.

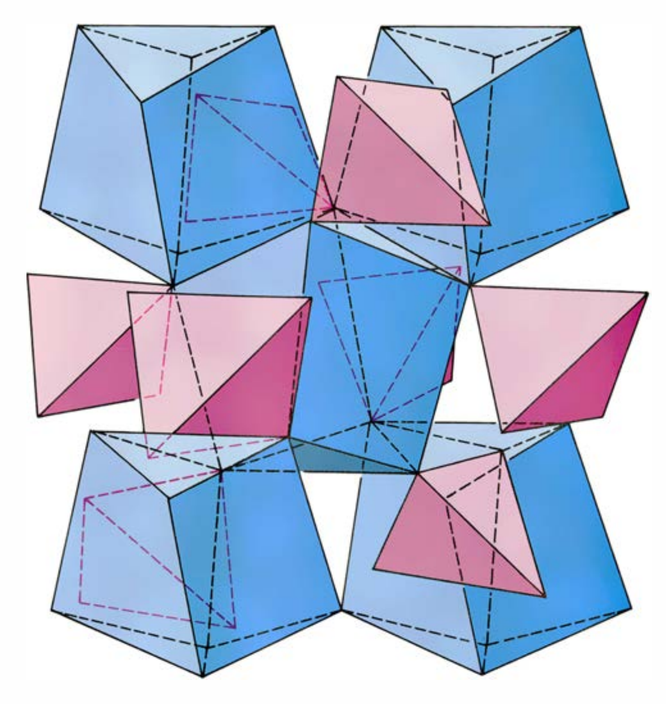
El acortamiento del enlace domina la compresión en las estructuras en que todos los poliedros se unen a los poliedros adyacentes compartiendo aristas o caras. En estas estructuras no hay moléculas discretas para la compresión intermolecular, y la flexión del ángulo de enlace no puede ocurrir sin fuertes distorsiones poliédricas, que por otra parte no se observan. Así el conocimiento de la magnitud de la compresión poliédrica es suficiente para predecir el comportamiento de estos cristales sometidos a compresión.

Los compuestos binarios sencillos como óxido de litio, cloruro sódico y cloruro de cesio están entre las estructuras poliédricas más sencillas para establecer un modelo a altas presiones [*véase la figura 3*]. En cada uno de estos cristales la compresibilidad total es idéntica a la de los poliedros que lo componen; una medida del cambio macroscópico de volumen con la presión corresponde a una medida directa de la compresión poliédrica. Cuando se aplica una presión a estas estructuras, tiende a disminuir la distancia entre los átomos sin traducirse en un cambio significativo en sus posiciones relativas.

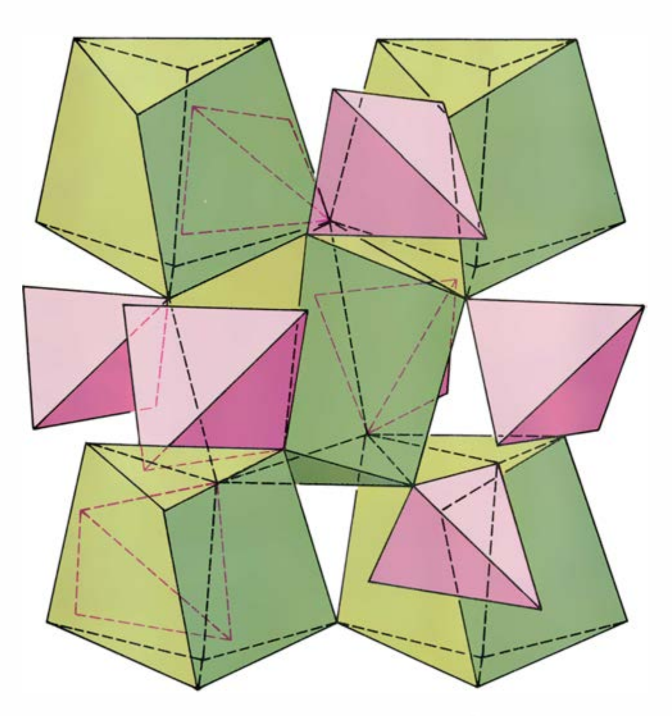
Los óxidos binarios, que tienen dos clases de agrupamientos catión-anión, presentan a menudo un comportamiento más complejo. Los compuestos del tipo scheelita que tienen la fórmula química general ABO_4 (en la que los símbolos arbitrarios AB representan una combinación de iones metálicos), son particularmente interesantes debido a la gran variedad de pares de cationes



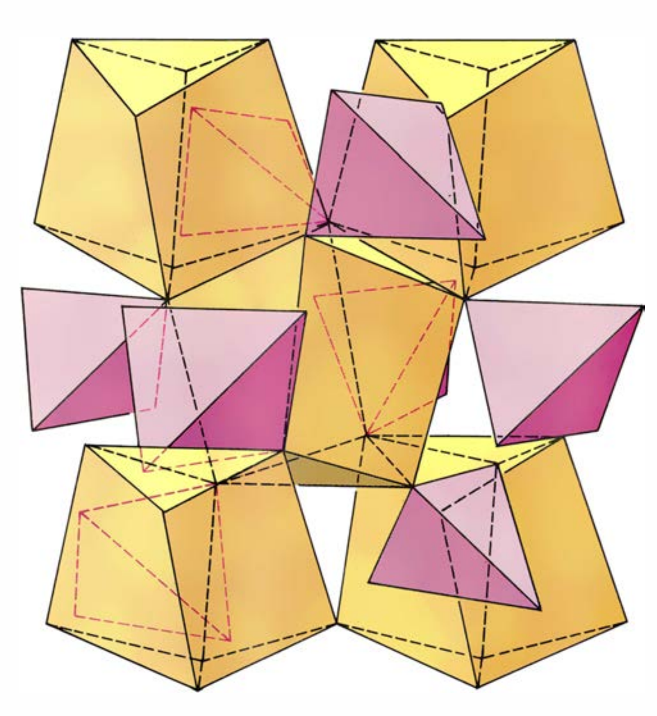
IODATO DE SODIO ($NaIO_4$)



TUNGSTATO DE CALCIO ($CaWO_4$)



VANADIATO DE BISMUTO ($BiVO_4$)

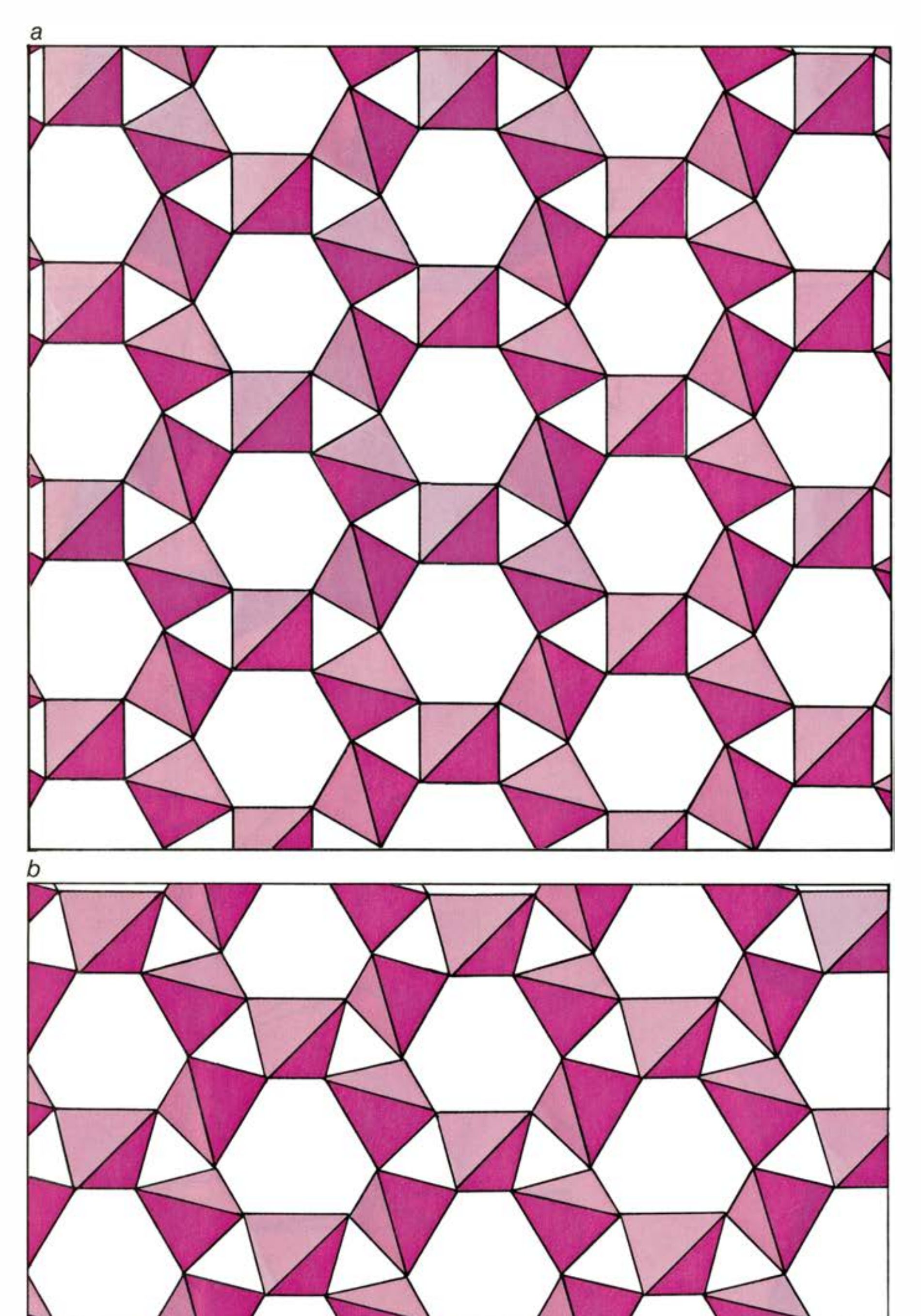


GERMANATO DE CIRCONIO ($ZrGeO_4$)

4. COMPUESTOS DEL TIPO SCHEELITA, que tienen la fórmula química general *AB*O_4, integrados por dos tipos de poliedros de cationes. Los tetraedros pequeños *B*, mostrados en rojo, son bastante incompresibles y ocupan sólo un 5 por ciento del volumen del cristal. Los poliedros grandes *A*, que pueden verse como cubos distorsionados, forman una red tridimensional continua y llenan la mayor parte del volumen del cristal. Así, la reducción de volumen en el cristal al aumentar la presión está determinada principalmente por la compresión de los poliedros grandes *A* con coordinación ocho. Las cuatro scheelitas representativas que recoge la ilustración son idénticas en la estructura cristalina; sin embargo, los cristales totales difieren en compresibilidad debido a las grandes diferencias en compresibilidad de sus poliedros componentes *A*. En este caso el rango de compresibilidad se indica con un espectro de colores; el extremo rojo del espectro señala estructura con enlaces menos compresibles; el violeta, la estructura con los más compresibles.

AB que se observan forman esta estructura [*véase la figura 4*]. Por regla, la compresibilidad de una scheelita viene determinada por la compresibilidad del poliedro grande *A*, que, a su vez, dependerá de la carga electrostática del catión *A*.

Distintas compresibilidades poliédricas conducen a un comportamiento anisótropo o dependiente de la dirección en algunos cristales bajo presión. Por ejemplo, el olivino, un mineral común en la composición de las rocas cuya fórmula es Mg_2SiO_4, posee una serie de octaedros con magnesio en el centro que ocupan el espacio de manera similar a como lo hacen los octaedros en la estructura del cloruro sódico. Sin embargo, en el olivino los tetraedros rígidos con silicio en el centro comparten aristas con los octaedros en un plano de



5. **ESTRUCTURA DE UN CRISTAL DE CUARZO (SiO_2); consistente en una compleja red tridimensional de tetraedros con silicio en el centro cuyos vértices están todos compartidos (*a*). En el cuarzo la compresión se atribuye principalmente a la flexión de los ángulos de enlace entre los poliedros (*b*). Un cristal de cuarzo es 10 veces más compresible que los poliedros que lo componen. El cuarzo sirve de contraejemplo contra la noción intuitiva de que las sustancias más duras son las menos compresibles; debido a su fuerte armazón de enlaces silicio-oxígeno, el cuarzo constituye uno de los compuestos más duros de la naturaleza y, ello no obstante, entra en la composición de las rocas más compresibles.**

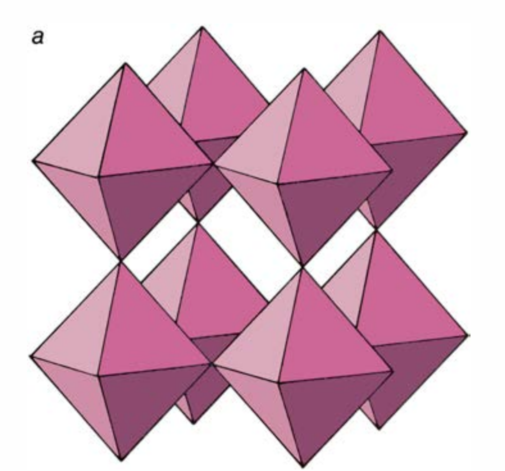
la estructura. Como resultado de ello, la compresibilidad del olivino en este plano es sólo alrededor de la mitad del valor observado en la dirección perpendicular sin comprimir. Los pequeños poliedros rígidos con silicio en el centro, aunque sólo representan una pequeña fracción del volumen, tienen una influencia importante en las propiedades globales del mineral.

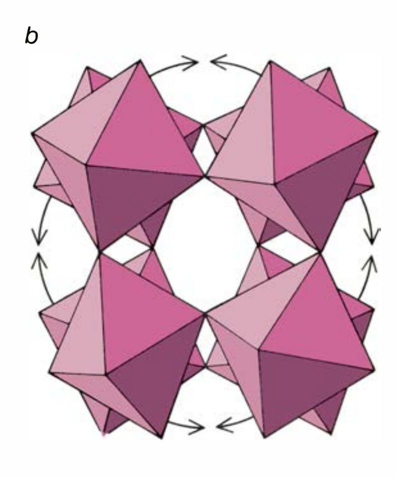
En todos los ejemplos considerados anteriormente, los poliedros comparten aristas o caras; no observándose flexión del ángulo de enlace en estas estructuras. Si los poliedros comparten los vértices en una estructura, el volumen del cristal se reduce a menudo por cambio de los ángulos entre los poliedros en lugar de por un acortamiento significativo de los enlaces iónicos dentro de ellos. El omnipresente mineral de cuarzo, el óxido de silicio más común, es quizás el ejemplo mejor conocido de este fenómeno [*véase la figura 5*]. Los bloques básicos que configuran la estructura del cuarzo son tetraedros con silicio en el centro, cada uno de los cuales comparte cuatro vértices con otros cuatro tetraedros para formar una estructura tridimensional continua. Los tetraedros con sus cationes altamente cargados son bastante rígidos; cambian de volumen en menos de un uno por ciento, incluso a presiones altísimas, de decenas de miles de atmósferas. No obstante, los cristales de cuarzo son diez veces más compresibles que los poliedros que los componen, debido a que los ángulos entre los tetraedros pueden flexionarse libremente. La flexión de los ángulos de enlace entre los iones de silicio y oxígeno requiere mucha menos energía que el acortamiento de los enlaces entre los iones, convirtiéndose así la "inclinación" de los poliedros en un mecanismo de compresión mucho más eficiente.

En algunos compuestos, la inclinación de los poliedros es responsable de una importante transición de fase. Por ejemplo, el óxido de renio (ReO_3) se compone de octaedros extremadamente incompresibles, cada uno de los cuales posee un catión de renio en el centro rodeado de seis aniones de oxígeno [*véase la figura 6*]. A presión y temperatura ambiente normales, el cristal presenta simetría cúbica; es decir, todos los octaedros se comprimen para alinearse por sí mismos a lo largo de los ejes de un cubo. La inclinación no es posible en esta forma cúbica del cristal y el óxido es, por tanto, incompresible. Sin embargo, un cambio sorprendente

tiene lugar a una presión de 5000 atmósferas. El óxido experimenta una transición de fase hacia una forma con la misma unión de los octaedros, pero con un grado de simetría menor; como resultado de ello los agrupamientos de renio-oxígeno se pueden inclinar libremente. En el punto de transición la compresibilidad del cristal aumenta más de diez veces, por la sencilla razón de que el mecanismo principal pasa de ser el acortamiento de enlaces a convertirse en la flexión del ángulo de enlace.

Los mayores cambios de dimensión observados en cristales a altas presiones se asocian con la compresión intermolecular. Los enlaces débiles entre moléculas adyacentes pueden acortarse en más de un uno por ciento por cada 1000 atmósferas. Este efecto tan grande domina el comportamiento de cualquier material bajo compresión, si éste posee enlace molecular. Las sustancias condensadas más sencillas que presentan enlace molecular son cristales a alta presión de elementos que son gaseosos en condiciones ambiente normales. Por ejemplo, los gases nobles neón y argón pueden licuarse a temperaturas muy bajas e introducirse a continuación en el interior de una celdilla de yunques de diamante. Los fluidos elementales cristalizan a altas presiones e incluso a temperatura ambiente conservan su forma cristalina, si se confinan a presiones de varios miles de atmósferas. En consecuencia es posible estudiar las estructuras y compresibilidades de las fases cristalinas.





6. OXIDO DE RENIO (ReO_3); consiste en una simple formación de octaedros con renio en el centro unidos por los vértices. Cada catión de renio se coloca en el vértice de un cubo unidad de la estructura cristalina; los enlaces renio-oxígeno se disponen a lo largo de las aristas del cubo (*a*). Bajo condiciones ambiente normales, este compuesto es uno de los óxidos conocidos menos compresible, porque la compresión puede suceder únicamente por acortamiento de los rígidos enlaces iónicos. A una presión de alrededor de 5000 atmósferas, sin embargo, el óxido de renio sufre una transición de fase a una estructura con la misma disposición de los octaedros, si bien dotada de un menor grado de simetría (*b*). El volumen de la estructura de alta presión se reduce por el mecanismo más favorable de la flexión del ángulo de enlace o inclinación de los poliedros. En la transición, la compresibilidad aumenta más de diez veces.

Los experimentos de difracción de rayos X revelan que, a alta presión y temperatura ambiente, los cristales de neón y argón adoptan la estructura cúbica compacta, que es también característica de muchos elementos metálicos. Sin embargo, los cristales de gases nobles tienen compresibilidades sin precedentes en magnitud; se observan en estos materiales cambios de volumen de más de un uno por ciento por cada 1000 atmósferas, mientras que los metales con estructura cúbica compacta no pueden comprimirse más que aproximadamente una décima parte de esta cantidad.

Los gases que constan de moléculas multiatómicas pueden presentar el mismo comportamiento. Por ejemplo, el metano (CH_4) cristaliza a una presión de aproximadamente 16.000 atmósferas; la estructura es también cúbica compacta, pero la molécula de cinco átomos del metano constituye la unidad compacta, en vez de un átomo sencillo como el neón o el argón. Como en el caso de los cristales de gases nobles, la compresibilidad del metano cristalizado es del orden de un uno por ciento por cada 1000 atmósferas. Un cierto número de otros gases multiatómicos, incluidos el hidrógeno (H_2), oxígeno (O_2), nitrógeno (N_2) y dióxido de carbono (CO_2), forman también cristales moleculares sumamente compresibles a altas presiones.

Los cristales de gas presurizado se cuentan entre los más sencillos de cuantos presentan enlace molecular, pero no son los únicos. Virtualmente todos los cristales orgánicos, desde las formas sólidas de alcoholes e hidrocarburos con unas decenas de átomos por molécula hasta las proteínas gigantes con decenas de miles de átomos en cada unidad molecular, poseen enlaces moleculares de alta compresibilidad. Es fácil predecir que todas estas sustancias se comportarán como altamente compresibles, comparadas con los minerales inorgánicos que componen la tierra sólida. Es también fácil imaginarse la gran compresión anisotrópica que debe presentarse en algunos cristales moleculares orgánicos, como los polímeros, en los que fuertes enlaces carbono-carbono forman cadenas continuas a lo largo de un eje del cristal y se unen lateralmente sólo por débiles fuerzas intermoleculares.

Las estructuras atómicas estratificadas presentan un comportamiento fascinante y revelador sometidas a compresión. Los compuestos estratificados son anisótropos por definición; el enlace dentro de cada capa es más fuerte que el enlace entre las capas. Estas diferencias en el vigor del enlace producen contrastes en la compresibilidad a lo largo de las diferentes direcciones del cristal. El grafito, la forma más corriente de carbono elemental, es un ejemplo clásico de estructura estratificada. El enlace carbono-carbono dentro de cada capa es tan fuerte como en el diamante y, sin embargo, las capas adyacentes están enlazadas por fuerzas moleculares tan débiles que el grafito es muy apreciado como lubricante. El contraste entre la compresibilidad paralela y perpendicular a las capas es también muy fuerte; la compresión entre las capas es más de 50 veces mayor que la de dentro de las capas.

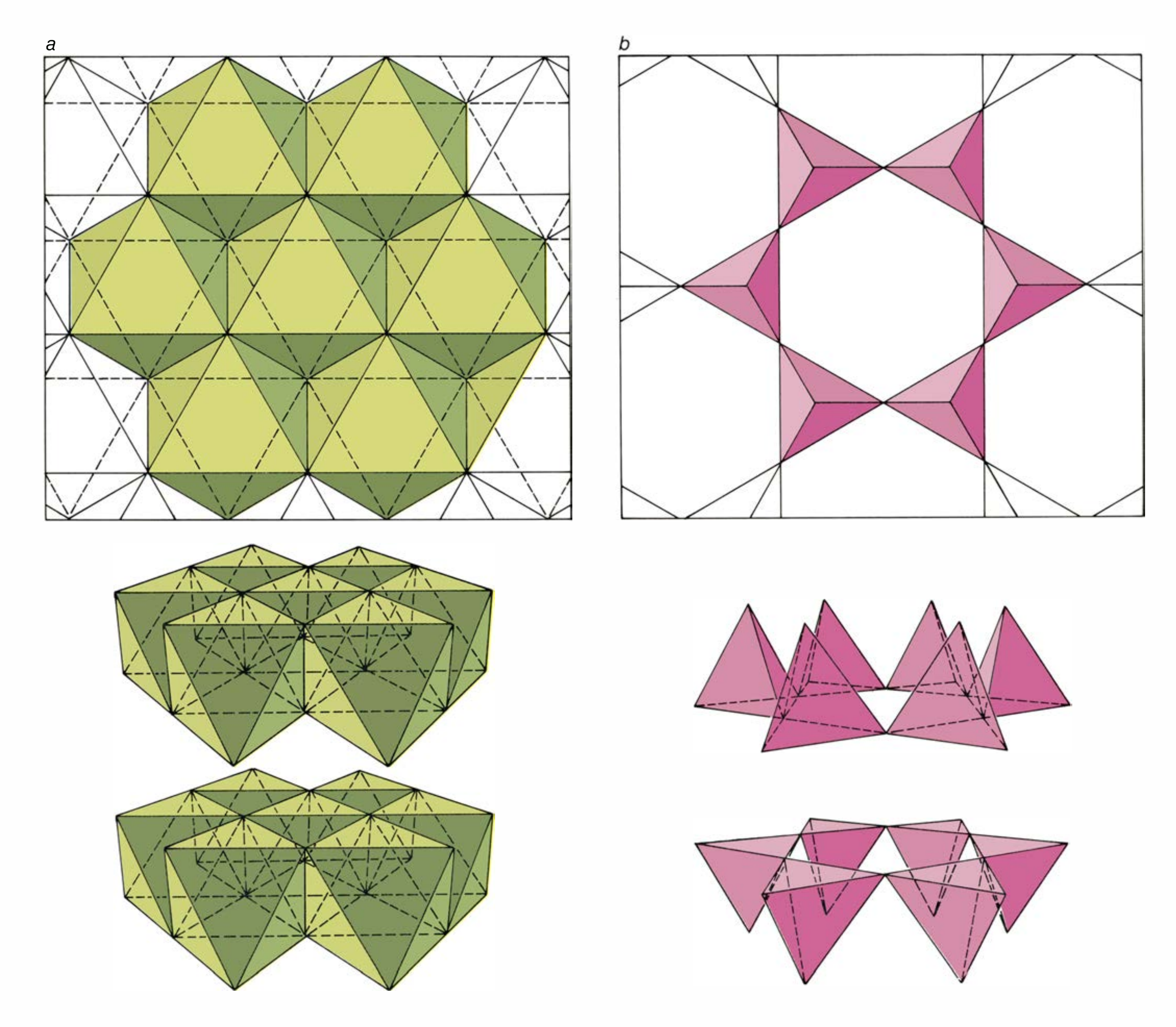
Los silicatos estratificados, incluyendo grupos de minerales corrientes, como micas, talcos y arcillas, pueden responder a la presión por combinación de los tres mecanismos de compresión: acortamiento del enlace, flexión del ángulo de enlace y compresión intermolecular. En virtud de ello, estos minerales nos aportan una óptima información relativa al modo como afecta la presión a la materia condensada.

Uno de los minerales estratificados más simples es la brucita o hidróxido de magnesio, $Mg(OH)_2$; es el ingrediente activo de la leche de magnesia. El bloque principal que constituye esta estructura es un octaedro de magnesio coordinado con seis pares

oxígeno-hidrógeno. Los poliedros se unen compartiendo aristas para formar capas continuas que tienen el espesor de un poliedro. Planchas de octaedros, cada una con la composición básica de la brucita, se apilan una encima de otra y se enlazan mediante fuerzas intermoleculares.

La compresión del hidróxido de magnesio dentro de las capas de octaedros está controlada por el acortamiento de los enlaces oxígeno-magnesio y, en consecuencia, es similar a la compresibilidad del óxido de magnesio. La compresibilidad perpendicular a las capas es varias veces mayor.

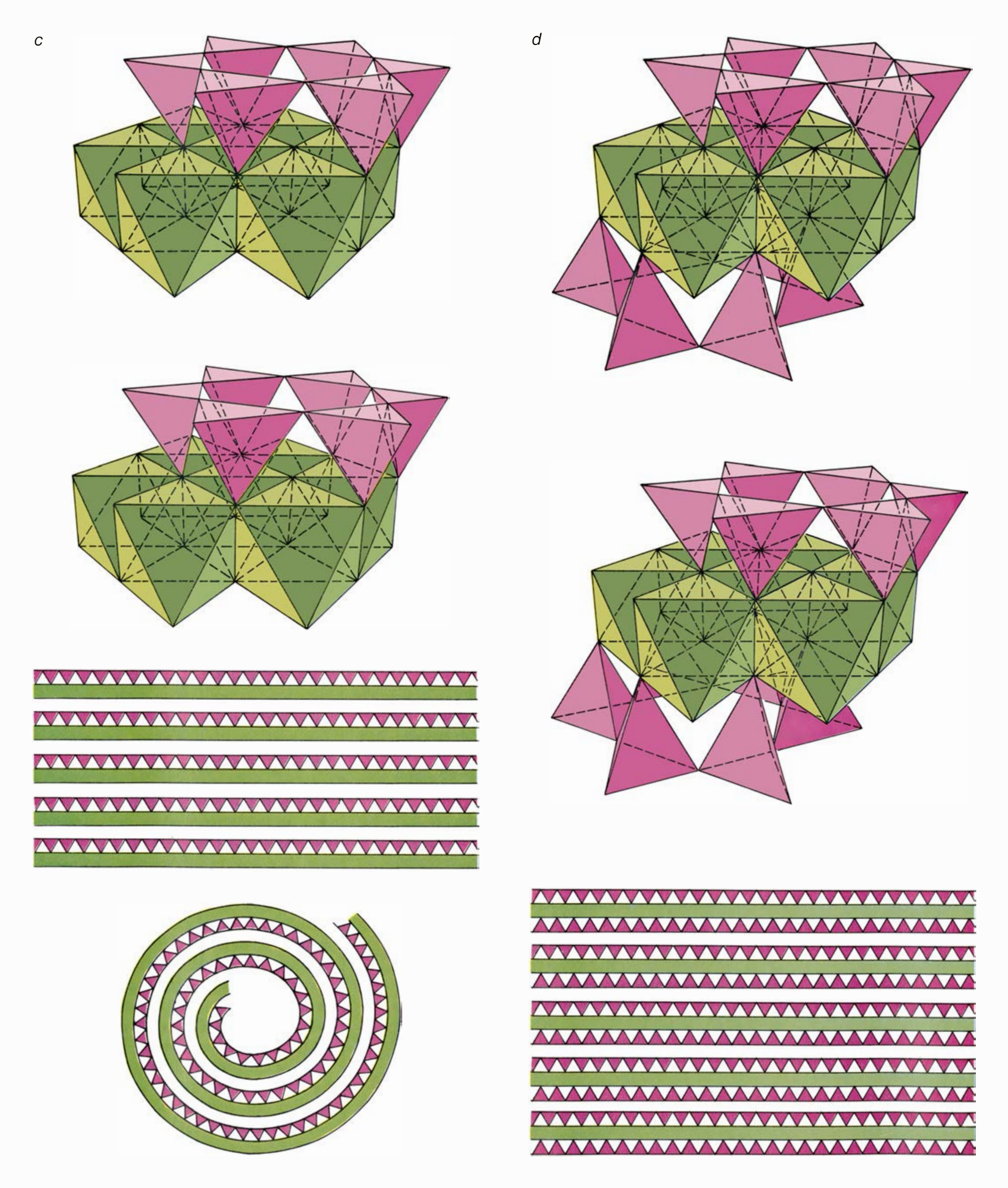
Los silicatos estratificados se componen todos de varias capas de poliedros apiladas en una secuencia regular. Una capa de octaedros como la de la brucita es característica compartida por los silicatos estratificados de magnesio, así como también lo es una capa de tetraedros de silicio. Esta última difiere de la



7. LOS SILICATOS ESTRATIFICADOS poseen una estructura cristalina característica, que se basa en el apilamiento de láminas de octaedros y tetraedros. Por ejemplo, la lámina de octaedros vista desde arriba y de perfil en el panel *a* (*columna de la izquierda de esta página*) consta de una capa única de octaedros con un catión en el centro que comparten las aristas. La estructura más sencilla que presenta esta característica es el mineral de brucita, o hidróxido de magnesio $Mg(OH)_2$, en el que las capas de octaedros se unen por débiles enlaces moleculares. La compresibilidad de la brucita dentro de las capas está determinada por la compresibilidad de los enlaces magnesio-oxígeno; sin embargo, la compresibilidad entre las capas es mucho mayor. En contraste, la lámina de poliedros de dióxido de silicio mostrada en el panel *b* (*columna de la derecha de esta página*) se compone de tetraedros con silicio en el centro, unidos por los vértices para engendrar una formación infinita en dos dimensiones de anillos con seis componentes. La compresión de la capa está facilitada por la flexión del ángulo de enlace, lo que es más favorable desde el punto de vista energético que el acortamiento de los rígidos enlaces silicio-oxígeno. Por ejemplo, el grupo de minerales de la serpentina está formado por la superposición de una de esas láminas de tetraedros sobre una de las anteriormente mencionadas de octaedros (*c*). En esta estructura se comparten algunos átomos de oxígeno por ambas capas de poliedros. Las láminas de poliedros están unidas también por fuerzas intermoleculares, que son tan débiles que muchas serpentinas no logran formar cristales regulares tridimensionales. Las distintas capas a menudo se doblan, rizan o incluso se enrollan como una alfombra para formar cristales largos semejantes a una aguja. En efecto, las dos capas distintas de poliedros que forman la lámina de serpentina se comportan como una cinta bimetálica en un termostato. Un resultado curioso es que la estructura de la serpentina que es básicamente plana da lugar al más fibroso de todos los minerales: el asbesto crisótilo (*parte inferior del panel c*). Por otro lado, los silicatos estratificados como el talco se componen de una pila de tres láminas, cada una de las cuales consta de una capa de octaedros intercalada entre dos capas de tetraedros (*d*). Debido a la secuencia simétrica de las capas, el talco es incapaz de doblarse. La compresibilidad del talco dentro de las capas es igual a la de la capa de octaedros, mientras que la compresibilidad entre las capas resulta ser varias veces superior.

capa de octaedros en que todas las unidades poliédricas comparten los vértices con las adyacentes en la misma capa. Aunque los tetraedros individuales son rígidos, las propias caras son muy compresibles debido a la flexión del ángulo de enlace. Esto es también importante porque permite que se adapte, para un amplio rango de composiciones diferentes, el tamaño de la capa de tetraedros al espaciamiento más comprimido de los octaedros. En consecuencia, las micas, arcillas y otros silicatos estratificados se presentan en un rango notable de composiciones.

Varios silicatos estratificados constan, por entero, de láminas de octaedros y tetraedros. Por ejemplo, en la serpentina, capas alternativas de octaedros y tetraedros están enlazadas por fuerzas intermoleculares. La compresión anisótropa de la serpentina es similar a la del hidróxido de magnesio: la compresión es mucho mayor en la di-



rección del débil enlace intercapas. El hecho más destacable de esta estructura está relacionado con las anisotropías de enlace. Las dos capas de poliedros se unen en vértices compartidos flexibles entre octaedros y tetraedros. Además, cada capa puede doblarse. Como resultado de ello las capas de serpentina pueden curvarse y formar cristales fibrosos en los que las capas atómicas se enrollan como una alfombra. Esta forma fibrosa de serpentina, denominada asbesto crisótilo, tiene una estructura atómica estratificada que contrasta con muchos otros cristales con forma de aguja, en los que largas cadenas de átomos se alinean a lo largo del eje del cristal. La forma del cristal, así como la compresión anisótropa, es una consecuencia de la gran diferencia de la fortaleza del enlace dentro y entre las capas de poliedros.

Los silicatos del tipo del talco constan de una capa de octaedros intercalada entre dos láminas de tetraedros. Estos minerales estratificados comunes, usados durante siglos en lubricantes y como polvos de talco, son otro ejemplo de propiedades anisótropas que resultan del enlace anisótropo. El talco y la serpentina presentan los tres mecanismos de compresión. El acortamiento de los enlaces magnesio-oxígeno y silicio-oxígeno tiene lugar dentro de las capas de poliedros. Las capas de tetraedros se adaptan al tamaño de las de octaedros mediante cambios en los ángulos de enlace silicio-oxígeno. La compresión intermolecular explica la mayor reducción de volumen perpendicular a las capas. Sin reconocer cada uno de estos tres mecanismos comunes de compresión del cristal, no es posible comprender o describir la respuesta de estas y otras estructuras a las altas presiones.

En suma, el método poliédrico mejora la interpretación de la compresión de los cristales y de otras propiedades de éstos, estableciendo correlaciones entre interacciones a escala atómica y el comportamiento macroscópico del cristal. El método es empírico por cuanto se basa en datos experimentales, no en predicciones teóricas. Es complementario a métodos químico-cuánticos que pueden conducir a cálculos de las propiedades del cristal a partir de postulados básicos, pero no son todavía aplicables a las estructuras multiatómicas encontradas en la naturaleza. Por tanto, el método poliédrico facilita grandemente los esfuerzos para interpretar la compresión de los cristales y otros fenómenos del mundo real.

Percepción de un entorno estable

Percibimos estable nuestro entorno pese al movimiento relativo que le confiere nuestro propio movimiento. Ello es así porque el sistema perceptivo es capaz de compensar tales desplazamientos

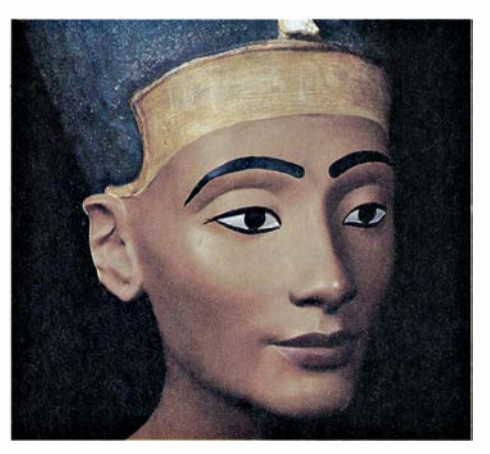
Hans Wallach

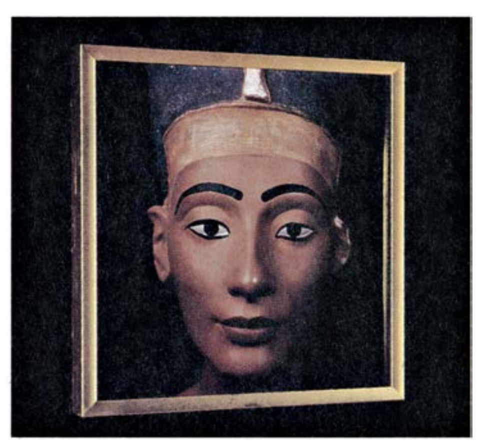
El mundo gira en torno a un observador a medida que éste se desplaza por él. Cuando se aproxima a un objeto, éste crece dentro de su campo visual; a su paso, los objetos giran con respecto a su posición variable. Un giro o una inclinación de cabeza altera la orientación del entorno; los movimientos oculares cambian la imagen del mundo que se proyecta en la retina. Sin embargo, no solemos ser conscientes de los movimientos ambientales precipitados por nuestra propia actividad. ¿Qué mecanismos nos permiten ignorar los efectos de nuestro propio movimiento y percibir estable el medio que nos rodea? En 12 años de análisis sobre ese punto varios investigadores, entre los que me cuento, hemos descubierto elegantes y precisos procesos de compensación.

Un observador ve una escena fija cuando vuelve la cabeza, pero percibiría el entorno en movimiento si éste girara permaneciendo él quieto. Podría creerse que estas tendencias reflejan un bloqueo perceptivo, desencadenado por señales que indican movimiento corporal procedente de tendones, articulaciones y órganos vestibulares. También, que cualquier percepción de movimiento ambiental queda descartada en presencia de dicha información propioceptiva.

Resulta fácil rebatir esa hipótesis. Un sujeto que lleve gafas que inviertan la dirección en la que gira su entorno cuando vuelve la cabeza será plenamente consciente, al menos al principio, del movimiento de lo que le rodea. De modo similar, un sujeto que camine hacia delante mirando un gran espejo colocado frente a sus ojos percibirá que el reflejo del entorno que deja tras de sí disminuye o retrocede. Esos desplazamientos son iguales en magnitud, aunque opuestos en dirección, a los que normalmente se producen frente a un observador que camina hacia delante; mientras que los desplazamientos normales pasan desapercibidos, el sujeto se da cuenta cabal de los movimientos anormales de la escena que contempla en el espejo.

Un ejemplo inverso pone igualmente de relieve que las entradas propioceptivas que indican movimiento del cuerpo no se limitan a bloquear la percepción del movimiento ambiental. En un efecto familiar para los visitantes de museos, la escena de un cuadro parece, a veces, rotar a medida que el espectador va dejándolo atrás; y así, independientemente de la posición real de este último con respecto al cuadro, parece mantener la misma relación frente a la escena representada; de modo similar, la cabeza del personaje de un cuadro puede parecer que gira hacia el espectador a medida que éste pasa por delante. Si la escena representada lo estuvie-






1. MOVIMIENTO APARENTE de una figura, una fotografía o un cuadro, con el que están familiarizados quienes suelen visitar museos. Cualquier objeto tridimensional, aquí la cabeza de Nefertiti, gira con respecto a un observador que se pone delante de ella en sentido opuesto al de su propio movimiento. Como muestra la fila superior, el observador ve el busto desde un ángulo que varía de forma estable, exactamente como si girara permaneciendo él inmóvil. El movimiento relativo de la figura, sin embargo, pasa

ra en tres dimensiones, giraría en el sentido contrario al de las agujas del reloj en relación a un observador que lo dejara a su derecha (y en sentido horario si lo dejara a su izquierda). La configuración de sus componentes cambiaría y, los elementos individuales, como la cabeza, se mostrarían desde un ángulo uniformemente variable. No obstante, el observador percibiría la escena como algo completamente inmóvil.

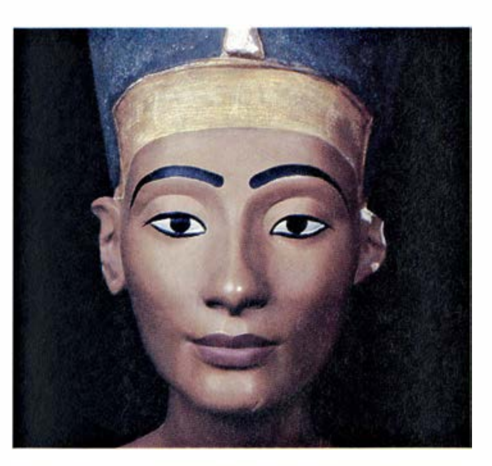
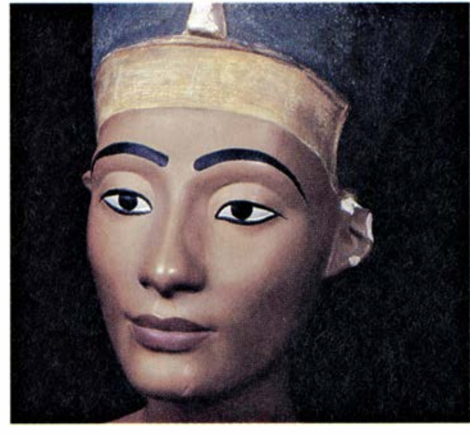
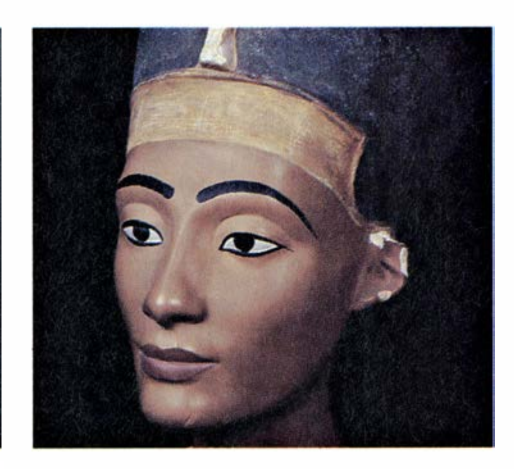
Sin embargo, puesto que la escena pintada es plana, y la disposición de sus elementos es la misma sea cual fuese la dirección desde la que se contemple el cuadro, no se produce esa rotación normal de la escena en sentido contrario al de las agujas del reloj. Simultáneamente, deja de parecer inmóvil y se diría que gira en sentido horario. Si la percepción del movimiento ambiental quedara bloqueada sin más cuando el observador se mueve, la ausencia de movimiento relativo normal no afectaría a la experiencia perceptiva.

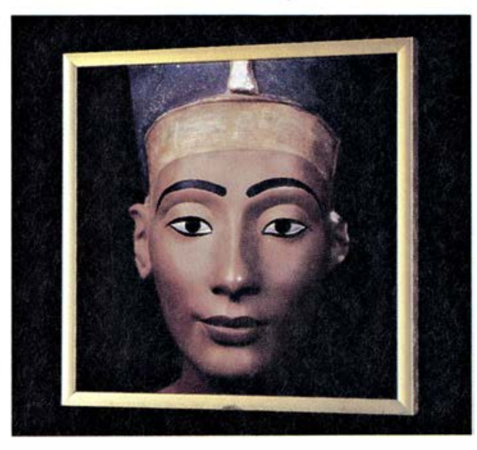
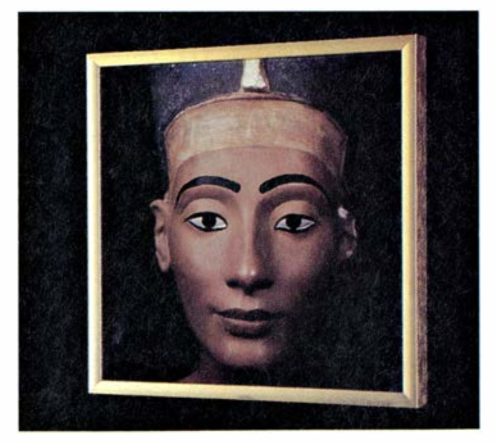
Tales observaciones sugieren que se compensan los datos visuales sobre los desplazamientos relativos del entorno, y no que se bloquean. Los mecanismos de compensación comparan las entradas visuales con los datos propioceptivos que representan el movimiento del cuerpo. Cuando lo visual y lo propioceptivo mantienen cierta relación constante, el entorno se percibe estable. Por el contrario, cualquier violación de esa relación provocará la sensación de movimiento.

En un primer paso hacia el conocimiento más detallado de ese proceso de compensación, Jerome H. Kravitz y el autor, a la sazón en el Swarthmore College, estudiaron su precisión. Nos preguntamos cuánta discrepancia podía darse entre el movimiento del cuerpo y el movimiento ambiental sin que el observador percibiera su entorno en movimiento. Cuando el observador gira su cabeza 20 grados, el entorno visual suele desplazarse 20 grados en sentido opuesto, con lo cual el medio ambiente parece permanecer estable. ¿Seguiríamos suponiéndolo estable si se desplazara 15 grados, o 25, durante un giro de cabeza de 20 grados? Utilizando el vocabulario de nuestra investigación, ¿cuál es el margen de inmovilidad del giro de cabeza, el margen de desplazamientos ambientales reales en los que el medio circundante continuará pareciendo inmóvil?

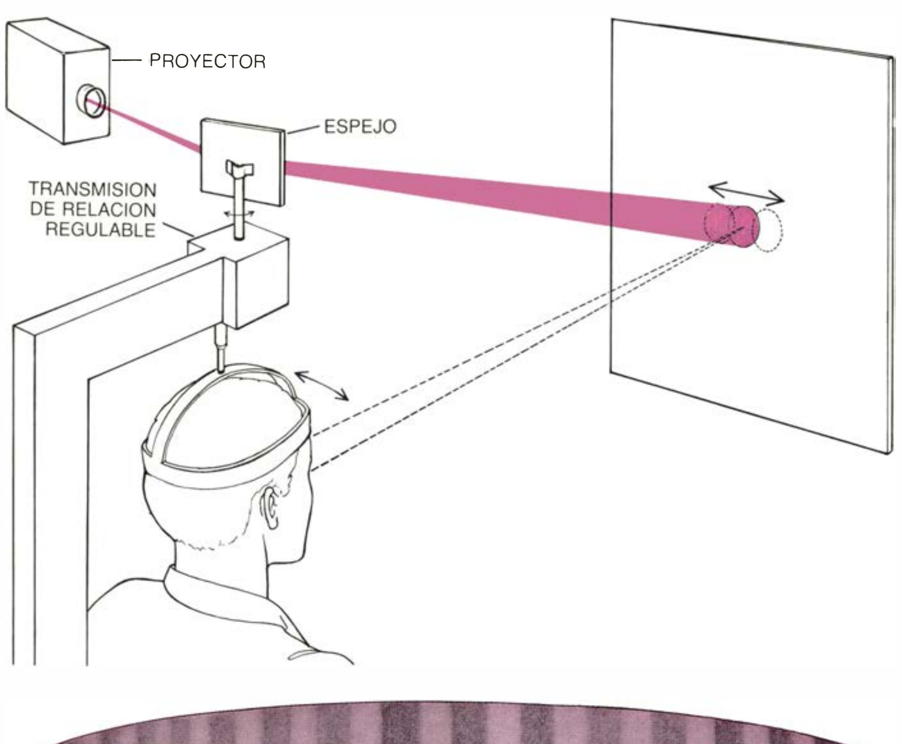
Con el afán de dar respuesta a la cuestión diseñamos un aparato experimental en el que los movimientos del entorno visual del sujeto pudieran emparejarse con movimientos de cabeza. El sujeto llevaba puesto un tocado al que se había cosido una correa vertical que caía directamente sobre el eje de rotación de la cabeza. El otro extremo de la correa penetraba en una transmisión de relación regulable, montada sobre la cabeza del sujeto. La correa de salida de la transmisión afectaba, a su vez, al entorno visual que se mostraba al sujeto.

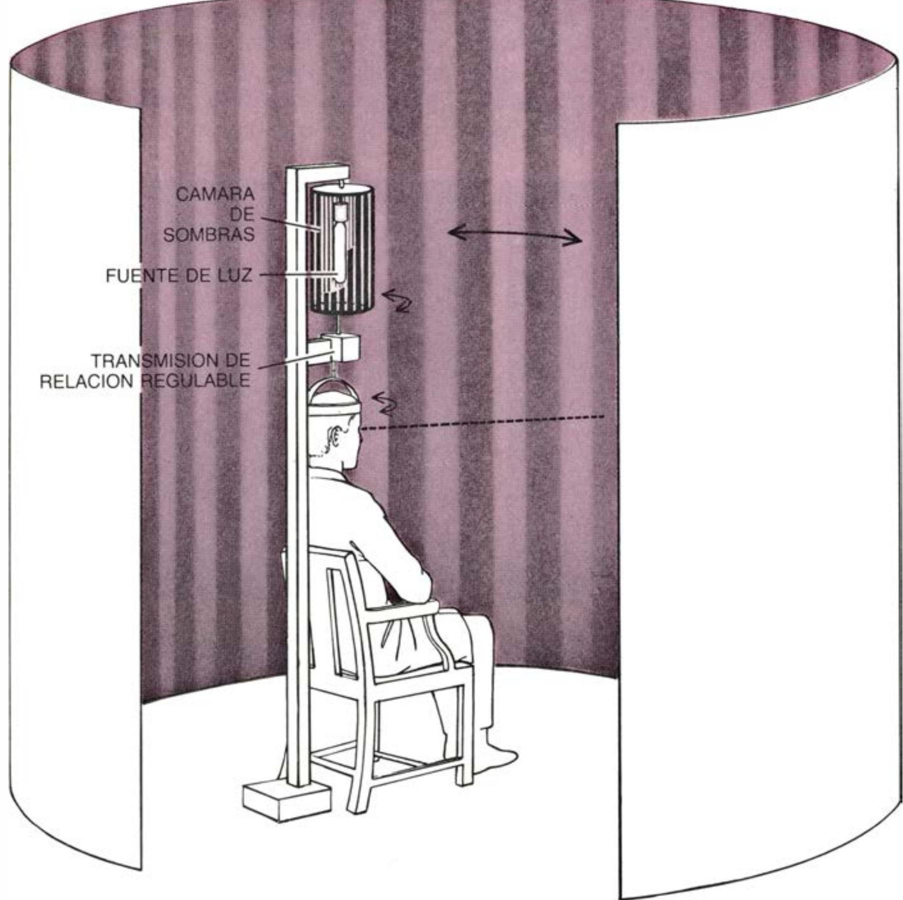
En algunos de nuestros experimentos se sujetó un espejo a la correa de salida. El haz de luz de un proyector de diapositivas se reflejaba desde el espejo sobre una pantalla situada frente al sujeto. Cuando se transmitían movimientos de cabeza a través de la correa de salida hasta el espejo, la imagen proyectada cruzaba la pantalla; la posición de la transmisión determinaba el

desapercibido; la figura parece inmóvil. En cambio, cuando se presenta un objeto o una escena en dos dimensiones, como sucede con un cuadro o en la fotografía de esa misma cabeza (mostrada en la fila inferior), no puede producirse esa misma rotación con respecto al observador. Aunque el que pasa por delante ve la representación desde distintos ángulos, no varía el ángulo desde el que la figura o escena está representada en la superficie bidimensional. En ausencia de la rotación contraria normal, el objeto o la escena representados dejan de parecer inmóviles y pasan a "girar" a los ojos del observador. Así, la mirada del busto parece seguir al espectador a medida que éste pasa por delante del retrato bidimensional. (Las fotografías son de Quesada/Burke.)





2. RELACION CINETICA DE LA CABEZA Y SU ENTORNO, que se alteró en un aparato dotado de una transmisión de relación regulable. Cuando el sujeto giraba la cabeza, una correa conectada al tocado llevaba la rotación hasta la transmisión. Esta impartía una proporción de ese movimiento al entorno visual. En algunos experimentos, la transmisión hacía girar un espejo, que reflejaba una imagen desde un proyector hacia una pantalla (*arriba*). La posición de la transmisión determinaba el punto hasta donde se desplazaba la imagen proyectada, y en qué sentido, dado un determinado ángulo de rotación de la cabeza. En otros experimentos, el entorno visual era un patrón de sombras, proyectadas, sobre una pantalla cilíndrica que rodeaba al sujeto, mediante una cámara de varillas que encerraba una fuente luminosa (*abajo*). La posición de la transmisión determinaba la relación entre la rotación de la cabeza del sujeto y el desplazamiento de las sombras. Este aparato permitió a los investigadores determinar el grado de sensibilidad de un sujeto al movimiento ambiental durante un giro de cabeza; también sirvió para demostrar que los sujetos que se adaptaban a desplazamientos anormales del medio acababan no percibiéndolos.

desplazamiento producido por un movimiento de cabeza hasta cierto punto. En otros experimentos sustituíamos el espejo y el proyector por una cámara de sombra, un dispositivo cilíndrico de varillas con un punto luminoso en el centro. El aparato proyectaba un patrón de sombras sobre una gran pantalla cilíndrica, dentro de la cual se encontraba el sujeto. Variando la posición de la transmisión podíamos alterar la relación entre el movimiento angular de las sombras y el ángulo de rotación de la cabeza.

A la hora de determinar el margen de inmovilidad en estas condiciones, elegimos como unidad de medida la relación de desplazamiento: la relación entre el movimiento real del entorno y el movimiento de la cabeza del sujeto. En un entorno estable, esta relación de desplazamiento es nula; en términos objetivos, durante la rotación de la cabeza, el entorno no se mueve. Conseguimos simular esa situación ajustando la transmisión de manera que no hiciera llegar movimiento alguno desde la cabeza hasta el entorno visual. Por el contrario, cuando ajustamos el aparato de modo que el entorno visual se moviera en la misma medida que la cabeza del observador, ya fuera en el mismo sentido o en sentido opuesto, la relación de desplazamiento era 1.

Para medir el margen de relaciones de desplazamiento dentro del cual un sujeto percibiría inmóvil su entorno visual, comenzamos por ajustar la transmisión de manera que dicho entorno quedara desplazado en el sentido de rotación de la cabeza, en una proporción lo suficientemente elevada para que el sujeto percibiera movimiento. A continuación, reajustamos la transmisión reduciendo la relación de desplazamiento poco a poco, de medio punto en medio punto porcentual. En cada paso, el sujeto muestreaba su entorno volviendo la cabeza de un lado a otro. El punto del continuo de relaciones de desplazamiento en el que el sujeto dejara de detectar movimiento señalaría un límite del margen de inmovilidad. Repetimos después el proceso para desplazamientos ambientales en sentido opuesto al del movimiento de la cabeza, para determinar el otro límite del margen de inmovilidad. Este procedimiento arrojó márgenes de inmovilidad que oscilaban entre relaciones de desplazamiento de 0,015 y 0,030 a cada lado de la inmovilidad objetiva. En otras palabras, nuestros sujetos no eran conscientes de los desplazamientos que no supe-

raran del 1,5 al 3 por ciento el alcance de sus movimientos de cabeza.

El margen de inmovilidad hallado en otros procesos de compensación resulta considerablemente más amplio. Otro movimiento relativo del medio para el que existe tal proceso es la rotación del objeto en relación con un observador de paso. Para estudiar el mecanismo de compensación, Linda Stanton y Dean Becker, entonces en el Swarthmore, y el autor construyeron un aparato por medio del cual se podía girar un objeto a medida que el sujeto pasara por delante del mismo.

De nuevo se utilizó el procedimiento de transmisión de relación regulable; el movimiento transverso del sujeto a medida que dejaba atrás el aparato se transmitía a la correa de entrada a través de una varilla horizontal, sujeta por un sistema de cables al tocado que llevaba el sujeto en la cabeza. El objeto de referencia (una esfera translúcida con un patrón oscuro sobre la superficie o un entramado de alambres luminosos) estaba suspendido de la correa de salida de la transmisión. La posición de la transmisión determinaba la relación entre el movimiento del sujeto y la rotación del objeto. Tal procedimiento nos permitió determinar que, para movimientos de este tipo, un observador no suele percibir rotaciones reales cuando ascienden a menos del 40 por ciento de su propio desplazamiento angular.

También resulta característico un margen de inmovilidad relativamente amplio del proceso que compensa los movimientos oculares, que desplaza la imagen del entorno que se proyecta sobre la retina del ojo. Al margen de nuestro experimento, Arien Mack, de la New School for Social Research, y William R. Whipple, que trabajaba en mi laboratorio, prepararon experimentos en los que los movimientos oculares del sujeto, controlados electrónicamente, desencadenaban el movimiento simultáneo de un punto luminoso o de un círculo que atravesaba la pantalla de un osciloscopio. ¿Qué sucedía si modificábamos el grado de desplazamiento? Mack comprobó que los sujetos percibían un giro de modo fiable sólo cuando éste subtendía un ángulo superior al 20 por ciento del movimiento ocular. En otras condiciones, Whipple halló una sensibilidad algo mayor: sus sujetos percibían movimientos que ascendían hasta un 8 por ciento o más de los movimientos oculares simultáneos.

El proceso de compensación del efecto de movimientos oculares resulta, pues, el más preciso de los mecanismos que se han estudiado, característica que sentó unas magníficas bases para su posterior estudio experimental. Dispuestos a averiguar cómo opera este proceso, expusimos a los sujetos a entornos en los que no se diera la relación biunívoca normal entre movimiento de cabeza y desplazamiento del entorno. Queríamos estudiar el efecto, sobre el sistema perceptivo, de un medio ambiente que se moviera desacompasadamente con respecto al giro de cabeza del observador.

Desde comienzos de este siglo sabemos que el proceso de compensación puede adaptarse a una relación anormal entre rotación de cabeza y desplazamiento ambiental. En 1896, George Stratton, de la Universidad de California en Berkeley, diseñó un sistema de lentes que invertía su entorno y producía el desplazamiento de su ambiente visual en el mismo sentido de sus movimientos de cabeza y no en sentido opuesto, que es lo normal. Al principio, notaba los movimientos anormales, pero, después de llevar puesto el artilugio durante dos días, su entorno se estabilizó. Su sistema perceptivo parecía haberse adaptado a la nueva relación entre sus movimientos y los propios del entorno —suposición que quedó confirmada cuando se quitó el artilugio ocho días después y descubrió que, una vez restablecida la relación normal, su entorno parecía oscilar fuertemente en sentido contrario al de los movimientos de su cabeza. En el proceso de adaptación a condiciones anormales, el margen de inmovilidad de Stratton había cambiado.

Nuestro montaje experimental para medir el margen de inmovilidad y nuestro sistema de caracterizarlo numéricamente nos permitieron, a Kravitz y a mí, estimar dichos efectos de adaptación. En un experimento inicial, los sujetos llevaban unas gafas gran angular que hacían que su entorno visual girara en la dirección del movimiento de cabeza hasta un 34 por ciento del alcance angular de la rotación de la cabeza (una relación de desplazamiento del 0,34). Seis horas después sometíamos a prueba a los sujetos utilizando el montaje experimental descrito anteriormente.

Sin las lentes, los sujetos sólo percibían su entorno estable cuando éste se movía en sincronía con el movimiento de sus cabezas a una relación de desplazamiento de 0,175, por término medio. Por tanto, su adaptación era parcial; su margen de inmovilidad había cambiado lo suficiente para acomodar aproximadamente la mitad del desplazamiento anormal que habían experimentado. Sin embargo, el alcance de la adaptación variaba enormemente entre los 12 sujetos; uno de ellos se adaptó por completo tras las seis horas de exposición, percibiendo estabilidad ambiental a una relación de desplazamiento de 0,34. En experimentos posteriores encontramos adaptaciones más rápidas. Utilizamos el propio aparato para lograr un entorno anormal; colocamos la transmisión a una gran relación de desplazamiento y hacíamos que el sujeto girara la cabeza de un lado a otro durante 10 minutos.

Aunque tal adaptación alteraba el margen de inmovilidad, desde una posición a horcajadas de la inmovilidad objetiva hasta otro punto de la escala de relaciones de desplazamiento, la amplitud del margen seguía siendo la misma. El proceso de compensación continuaba ofreciendo la misma precisión de antes. Parecía probable que la adaptación no alterara el proceso. Debía, por tanto, afectar a una de las entradas del mecanismo compensatorio: a los datos visuales del movimiento relativo del entorno del sujeto o a la información propioceptiva que indica el alcance de la rotación de la cabeza.

¿Qué categoría de entrada afecta a la adaptación a una nueva relación cinética entre cabeza y entorno? Supongamos que la adaptación altera las entradas propioceptivas del proceso de compensación de manera que, por ejemplo, el sistema nervioso transmita durante un giro de cabeza de 20 grados las mismas señales que envía normalmente para indicar un giro de 40 grados. El entorno visual necesitará entonces rotar en sincronía con el movimiento de cabeza un ángulo de 20 grados (equivalente a la relación de desplazamiento de 1) para que se perciba estable. Tal efecto de adaptación deberá resultar evidente, sin embargo, no sólo en el margen de inmovilidad visual, sino también en los márgenes de inmovilidad correspondientes a otros tipos de estímulos, ya que cada margen de inmovilidad refleja un proceso de compensación que actúa sobre las entradas propioceptivas.

Utilizando la transmisión de relación regulable para controlar el ritmo de desplazamiento de un sonido a lo largo de una fila de altavoces a medida que el sujeto giraba la cabeza, Kravitz y el

autor consiguieron contrastar el margen de inmovilidad auditiva de los sujetos. Comprobaron que la adaptación a cambios anormales en el entorno visual no se reflejaba en el margen de inmovilidad para sonidos, que permanecía centrado sobre la inmovilidad objetiva. Aparentemente, la adaptación que se había inducido en este ensayo afectaba únicamente a la base visual de la compensación.

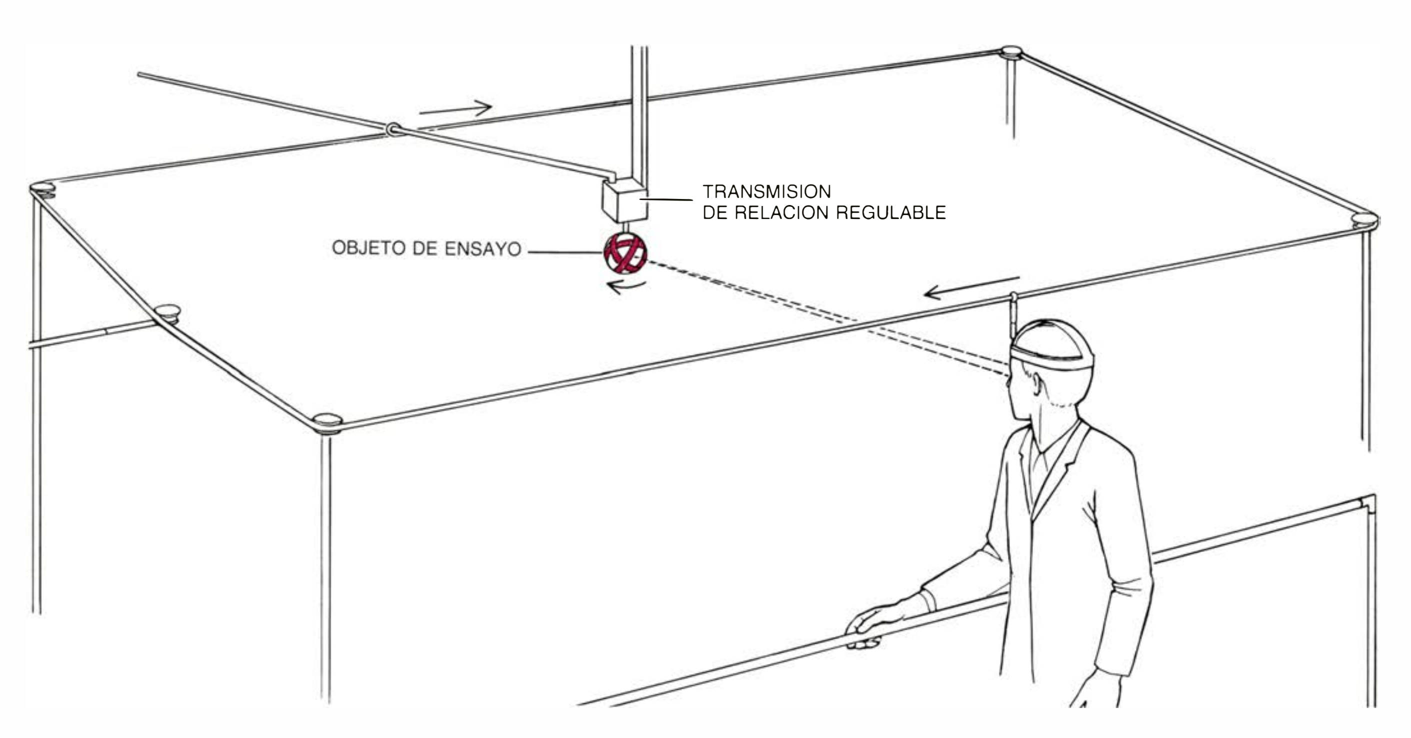
Se imponía, por tanto, una restricción del ámbito experimental. No cabía duda de que la adaptación comportaba una modificación de la información visual sobre el desplazamiento del entorno, de ahí que los experimentos de adaptación prometieran servirnos de herramienta experimental a la hora de revelar la naturaleza de esa información. Joshua Bacon, actualmente en la Universidad de Tufts, y el autor variaron las condiciones de adaptación con el fin de responder a dos cuestiones que se derivan de la experiencia cotidiana. Durante un giro de cabeza, los ojos suelen rastrear un solo punto del entorno. ¿Acaso las longitudes de los movimientos oculares necesarios para rastrear un punto fijo sirven de indicios visuales del desplazamiento del entorno? ¿O quizás entran los movimientos en el proceso de compensación de forma más compleja, en la que el entorno visual queda representado según su relación con la cabeza?

Haciendo uso de la transmisión de relación regulable, la cámara de sombra, con su fuente luminosa, y una segunda fuente de luz, Bacon y el autor separaron el entorno visual del sujeto en dos componentes, una que giraba durante los movimientos de cabeza y otra que no. En la primera serie de ensayos la pantalla que rodeaba al sujeto exhibía, a la vez, un patrón inmóvil de sombras y un punto de luz que se desplazaba con los movimientos de cabeza del sujeto a una relación de desplazamiento de 0,4. Al sujeto se le hizo fijar su mirada sobre la luz a medida que giraba la cabeza de un lado a otro durante un período de adaptación de 10 minutos.

La exposición a esas condiciones alteraba el margen de inmovilidad de los sujetos, de lo que cabía deducir que el alcance de los movimientos oculares desempeñaba un papel importante en el proceso de adaptación. Todo indicaba que, para inducir el tipo de adaptación evocado por los desplazamientos anormales del entorno global, bastaba con que un solo punto de fijación del entorno visual exigiera constantemente movimientos anormales de rastreo ocular. No obstante, el efecto de adaptación era menor que el que medimos para el mismo período de "adaptación normal", en el cual, como en experimentos anteriores, se movía el entorno completo durante el período de adaptación. Aunque los ojos de los sujetos no rastreaban el patrón fijo del fondo, se diría que éste también se contaba entre los datos visuales sobre desplazamiento ambiental, lo que daba lugar a una reducción del efecto de adaptación.

Para confirmar el papel desempeñado por el patrón de fondo se invirtieron las condiciones experimentales. En la segunda serie de ensayos, el punto de luz permanecía fijo y el sujeto giraba la cabeza, manteniendo fija la mirada sobre la luz; todo ello a la vez que el patrón de sombras se movía. De nuevo medimos un efecto de adaptación. Dado que los movimientos oculares con los que el sujeto rastreaba la luz eran de extensión normal, la adaptación sólo podía responder a una representación de las sombras y sus movimientos en relación con la cabeza del sujeto. Es de presumir que dicha representación se derivara del desplazamiento lento del patrón a través de la retina del ojo a medida que el sujeto giraba la cabeza.

Parecía que la respuesta a ambas cuestiones era afirmativa. El tipo de adaptación evocada por el primer experimento lo bautizamos adaptación del movimiento ocular, ya que parecía estar mediada sólo por el alcance de los



3. CON VARILLAS Y CABLES se transmitía un movimiento transversal del sujeto a la correa de entrada al dispositivo de transmisión de relación regulable, que hacía girar una esfera con dibujos. La regulación de la transmisión determinaba el alcance de la rotación del globo. El sujeto seguía con la mirada el objeto giratorio a la vez que, caminando, pasaba por delante, guiado por un pasamanos. El aparato pretendía determinar en cuánto debía, la rotación, apartarse de la rotación normal de un objeto inmóvil respecto de un observador de paso para que éste tuviera conciencia de que el objeto giraba.

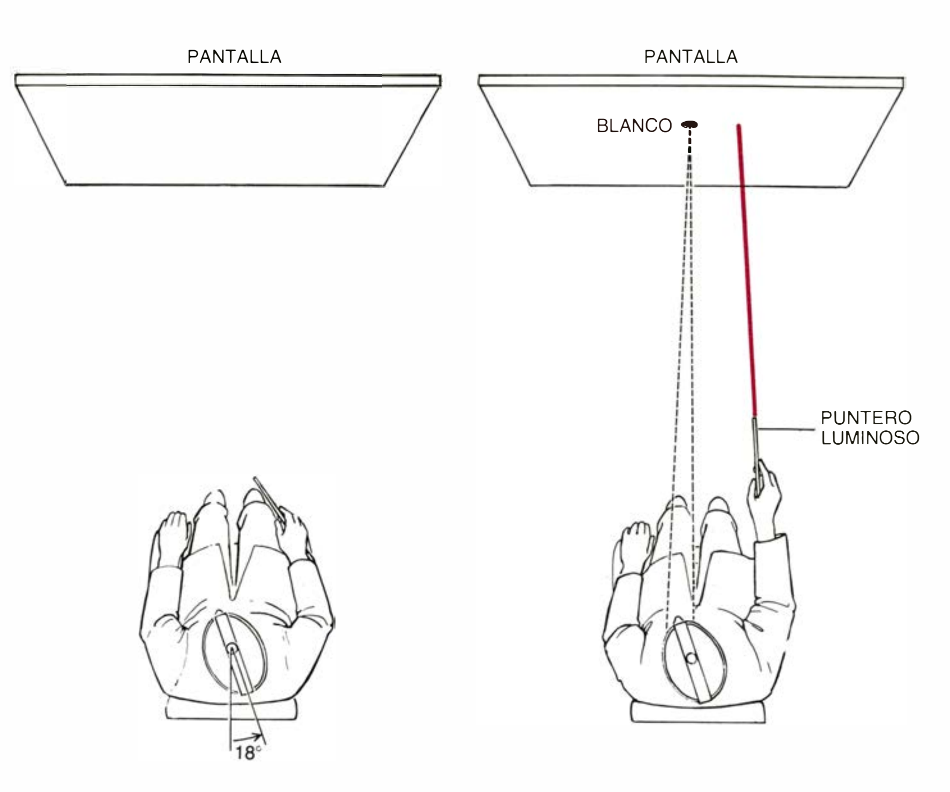
movimientos oculares. Al segundo efecto lo denominamos adaptación de campo; parecía reflejar desplazamientos del campo visual como un todo, separado de cualquier anomalía de los movimientos oculares que intervenían en el rastreo.

En experimentos posteriores Bacon y el autor confirmaron la distinción entre ambos tipos de adaptación. Los movimientos oculares de rastreo que compensan los movimientos de cabeza se producen tanto cuando el entorno presenta un punto fijo al que se dirige la mirada como en plena oscuridad, cuando los ojos no disponen de la guía de ninguna estimulación visual. Los movimientos compensatorios automáticos efectuados en la oscuridad se conocen como reflejo Dodge, que parece estar sintonizado de forma precisa con la relación normal entre rotación de la cabeza y movimientos de rastreo de los ojos y, por tanto, con la relación normal entre movimiento de cabeza y desplazamiento ambiental.

Sin embargo, al medir el alcance del reflejo Dodge en sujetos que habían pasado por 10 minutos de adaptación del movimiento ocular a una relación de desplazamiento de 0,4, hallamos un cambio significativo. El punto luminoso que rastreban los sujetos durante su período de adaptación se movía en el mismo sentido en que giraban la cabeza; en consecuencia, los movimientos de rastreo necesarios para un determinado alcance de movimiento de cabeza eran más breves de lo normal. Los movimientos del reflejo Dodge mostraban un acortamiento correspondiente, del 13 por ciento, por término medio. Hallamos, en cambio, movimientos reflejos normales en sujetos que habían experimentado adaptación de campo, señal de una ausencia total de alteración de los movimientos de rastreo.

También sometimos a prueba al grupo de sujetos a los que habíamos inducido adaptación normal. Al igual que los demás grupos, éste se había sometido a 10 minutos de adaptación a una relación de desplazamiento de 0,4; su margen de inmovilidad descendía ahora a una relación media de desplazamiento de 0,13. Nos sorprendió descubrir que el alcance del reflejo Dodge en esos sujetos era algo más breve de lo normal (un 13 por ciento, por término medio), cantidad equivalente al efecto de adaptación completo.

Para que un sujeto perciba estable el entorno cuando los movimientos oculares que lo rastrean son más cortos de lo

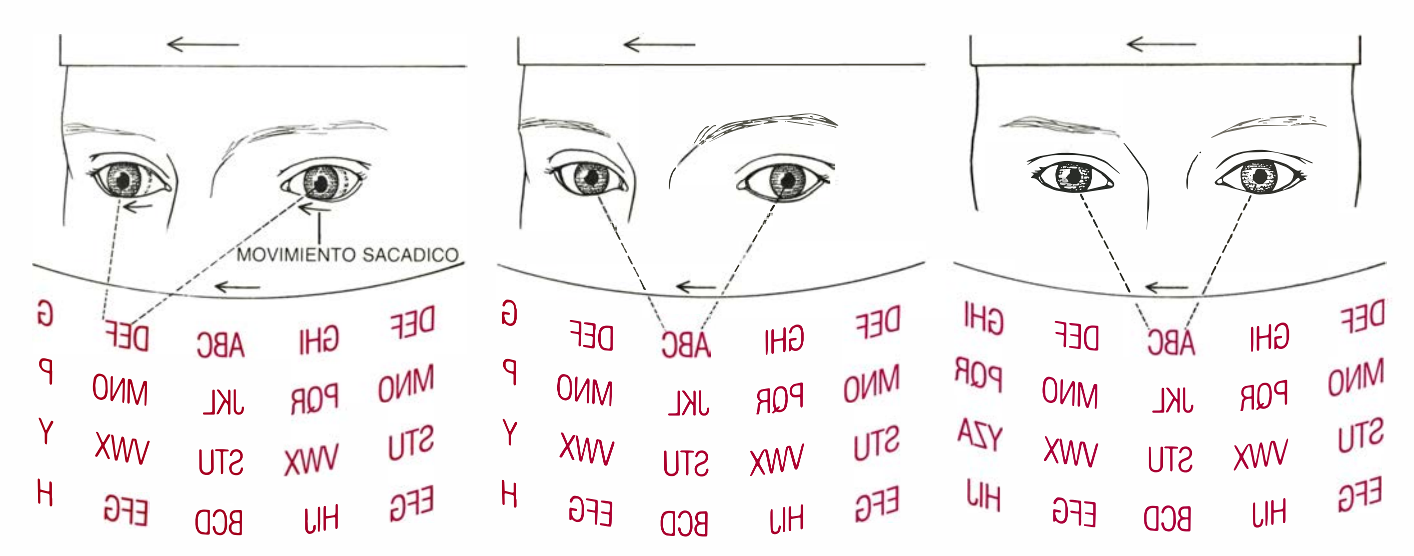


4. PRUEBA DE SEÑALAMIENTO. Se pedía al sujeto que apuntara hacia un blanco enjuiciando el movimiento ocular que había necesitado para mirarlo. El ensayo se efectuaba en una estancia a oscuras, de modo que el sujeto, que tenía en la mano un puntero, no pudiera señalar el blanco siguiéndolo con éste. En primer lugar, el sujeto giraba la cabeza hacia la izquierda: a un ángulo de 18 grados, el aparato tenía un tope que evitaba la prolongación de la rotación (*izquierda*). Cuando se iluminaba un punto sobre la pantalla situada delante del sujeto, éste llevaba la mirada hacia la derecha para fijar la vista en el blanco y señalarlo con el puntero. El investigador encendía entonces una fuente luminosa ubicada en el puntero y anotaba la distancia que separaba el punto luminoso del blanco. Los sujetos que se habían adaptado a una situación en la que todo el medio ambiente se desplazaba menos de lo normal durante el giro de cabeza, señalaban demasiado a la derecha (*derecha*), indicio de que habían juzgado erróneamente el alcance del movimiento ocular. Según parece, la adaptación a desplazamientos anormalmente cortos del entorno acarrea una sobrevaloración de los movimientos oculares necesarios para rastrear dicho entorno, de manera que los movimientos del medio se perciben más prolongados de lo que realmente son.

habitual, el sistema nervioso debe sobrestimar los movimientos de rastreo. Bacon y yo diseñamos una demostración directa de dicho efecto. En una sala oscura se colocaba el sujeto sentado en un aparato que limitaba el movimiento de la cabeza. Se le instruía para que girara la cabeza a la izquierda; a un ángulo de 18 grados, un tope impedía la continuación del movimiento y se iluminaba un objetivo colocado justo frente a su torso. El sujeto miraba entonces hacia dicho objetivo y apuntaba hacia él sin enderezar la cabeza. En la oscuridad, el sujeto no podía verse la mano, de modo que su apreciación de la dirección del objetivo dependía por completo de la valoración de su movimiento ocular.

Tras la adaptación del movimiento ocular, los sujetos señalaban con un error medio del 13 por ciento hacia la derecha; esto es, sobrestimaban sus movimientos oculares en una medida que indicaba con precisión el acortamiento que habíamos apreciado en las pruebas del reflejo Dodge. Hallamos un error similar en sujetos adaptados normales, pero los sujetos con adaptación de campo, que habían rastreado un punto fijo durante el período de adaptación y mostraban un reflejo Dodge normal, valoraban sus movimientos oculares con precisión y apuntaban directo al objetivo.

El reflejo Dodge y las pruebas de señalamiento únicamente detectaban adaptación del movimiento ocular; Bacon y el autor diseñaron otra prueba específica para la adaptación de campo. En la oscuridad, con la cabeza girada 18 grados hacia un lado, el sujeto tenía que mover un objetivo luminoso hasta colocarlo en posición recta, frente a su torso. Tanto los sujetos normales como los que mostraban adaptación del movimiento ocular realizaban esta prueba con éxito. Sin embargo, los sujetos con adaptación de campo erraban de manera significativa, situando el objetivo a un lado, con una desviación equivalente a una relación de desplazamiento de 0,087.



5. MOVIMIENTOS OCULARES DE RASTREO Y SACADICOS, evocados en un experimento que pretendía determinar el efecto de su combinación en la adaptación a un medio que se desplazaba anormalmente con la rotación de cabeza. Valiéndose del montaje de proyector y espejo que aparece en la figura 2, los investigadores presentaban un entramado de letras sobre una pantalla cilíndrica que rodeaba al sujeto. La transmisión de relación regulable que vinculaba la cabeza del sujeto al espejo provocaba un desplazamiento de la disposición, en sincronía con el movimiento de la cabeza, pero con un alcance angular más pequeño. Cuando el sujeto giraba la cabeza, tenía que leer una fila de letras, saltando de una columna a otra. De este modo, el sujeto realizaba movimientos oculares de rastreo, para fijar la vista en una columna a medida que giraba la cabeza (*derecha y centro*), y movimientos sacádicos, saltos bruscos, para desplazar la mirada de una columna a la siguiente (*izquierda*). Bajo estas complejas condiciones de movimiento ocular, el desplazamiento anormal del entorno visual se registraba de dos formas. Por una parte, en la longitud de los movimientos oculares de rastreo, que en el experimento eran más cortos de lo normal debido al movimiento de la imagen a contemplar. Por otra, según descubrieron los investigadores, en una representación de nivel perceptivo superior, que incorporaba el campo visual global del sujeto en relación a la cabeza. (Los dibujos son obra de Carol Donner.)

Tales resultados sugieren que la adaptación del movimiento ocular es el proceso que subyacía a la adaptación normal que se producía en nuestro aparato experimental. El rastreo de un solo punto durante el movimiento de cabeza daba lugar a la adaptación a desplazamientos anormales de todo el entorno visual. La adaptación de campo parece un fenómeno distinto. Probablemente se sitúe en un nivel superior del procesamiento perceptivo, nivel en el que se han tenido en cuenta la posición de los ojos y los movimientos oculares y en el que se representan los desplazamientos del campo visual entendido en su globalidad.

Aunque la adaptación de campo no desempeñaba papel alguno en la adaptación normal que indujimos, no cabe deducir de ello que, en circunstancias normales, los movimientos oculares señalen, por sí solos, el alcance del desplazamiento ambiental durante la rotación de la cabeza. El mundo cotidiano difiere de las condiciones experimentales que mis colaboradores y yo diseñamos. En términos concretos, un observador no siempre limita su mirada a un solo punto de su entorno cuando gira la cabeza.

En circunstancias normales, el rastreo de puntos solitarios se ve interrumpido a menudo por movimientos rápidos, denominados sacádicos, en los que los ojos pasan de un punto de fijación a otro. Un movimiento sacádico coloca en el centro del campo visual un punto del entorno al que antes no se dirigía la mirada. Para averiguar cómo se registraba el desplazamiento del entorno bajo estas condiciones, más complejas, diseñamos una situación de adaptación en la que el sujeto se viera obligado a entremezclar movimientos oculares de rastreo con movimientos sacádicos. Utilizamos la transmisión de relación regulable con un espejo y un proyector de diapositivas que mostraban columnas de letras; cada columna presentaba conjuntos de tres letras. La imagen incidía sobre una pantalla que llenaba el campo visual del sujeto. La disposición de las letras se desplazaba en virtud de una relación de desplazamiento de 0,4 cuando el sujeto movía la cabeza.

Se sometía a los sujetos a un período de adaptación de 10 minutos, durante el cual giraban la cabeza continuamente de un lado a otro. En cada giro a la derecha leían, de izquierda a derecha, las letras de una fila, correspondientes a columnas adyacentes. De este modo, los sujetos debían realizar movimientos sacádicos, necesarios para desplazar su mirada de una columna a otra, así como movimientos de rastreo, para fijar la mirada en las filas de letras. A continuación los sujetos pasaban la prueba de colocar un objetivo luminoso frente al torso con la cabeza girada, apreciándose un notable valor de la adaptación de campo.

Bajo estas condiciones experimentales, más elaboradas (y más reales), se registraron desplazamientos ambientales, no sólo en el nivel de los movimientos oculares, sino también en un nivel perceptivo superior. Parece probable que en circunstancias normales la compensación (que quizá conste de dos procesos simultáneos) emplee ambos tipos de entrada, comparándolos con los datos propioceptivos hasta lograr una percepción estable del entorno. Los mecanismos que se alteran en la adaptación del movimiento ocular y en la de campo intervienen a la par en la percepción cotidiana.

A través de procesos de compensación como el que mis colaboradores y yo hemos estudiado, nuestro sistema perceptivo capta un mundo que se mantiene tranquilizadoramente estable, a pesar de nuestro propio movimiento. En la vida real no somos conscientes de su operación; simplemente, nos ofrecen el mundo tal como es. Sin embargo, el análisis de cómo se logra la percepción de un medio ambiente estable revela la existencia de tales mecanismos. Sólo valiéndonos de experimentos de adaptación en los que alteramos las condiciones habituales de operación de esos procesos logramos poner al descubierto su funcionamiento.

Restauración de vidrieras medievales

Víctima de su propia naturaleza y de la polución atmosférica, el más brillante arte europeo está amenazado de destrucción. Todos los esfuerzos encaminados a su conservación dependen del conocimiento que se tenga del propio vidrio

Gottfried Frenzel

La religión ha visto siempre en la luz un símbolo. Significa por igual la Creación ("Hágase la luz", fue el primer mandato divino), como la Salvación (el evangelista San Juan contempló la Jerusalén celestial iluminada, cual si estuviera hecha de alabastro y con sus muros "como de cristal transparente"). Reflejos terrenales de tales visiones, obtenidas a lo largo de la Edad Media por vía de la luz, fueron las vidrieras coloreadas de las capillas, iglesias, monasterios y catedrales, del románico y del gótico, unas de las obras artísticas más brillantes del período. Durante casi un milenio, en el caso de las vidrieras más antiguas, el vidrio resultó casi indemne. Incluso durante la catastrófica segunda guerra mundial, los daños que en ellas se causaron fueron bastante tolerables. La verdad es que, en toda Europa, durante aquellos acontecimientos, se sacaron de sus emplazamientos con objeto de preservarlas. Hoy, sin embargo, existe la amenaza de su total destrucción, no por las guerras, sino por la polución atmosférica. Si los vitrales persisten "in situ", dado su actual estado de conservación, puede predecirse su ruina total dentro de nuestra propia generación.

Unos cuantos ejemplos servirán para ilustrar tal amenaza. Las vidrieras de la catedral de Colonia, en inmediata vecindad con la principal estación de ferrocarril de la ciudad, han sido extraordinariamente vulnerables. Resultaron afectadas por la intemperie y por la polución atmosférica ya desde mediados del siglo XIX. Contempladas desde el exterior, dan la impresión de ser láminas de yeso. La acción continuada de la polución ha corroído la superficie exterior del vidrio, reduciendo su espesor año tras año y cubriendo la superficie descompuesta de una costra. El proceso de desvitrificación comienza nuevamente cada vez que la lluvia elimina dicha costra. Entre tanto el vidrio coloreado se fragmenta en pequeñas partículas, que caen de los paneles desintegrando la vidriera.

En Inglaterra las vidrieras están expuestas a una intensa contaminación. La catedral de Canterbury muestra bien a las claras sus consecuencias. Dicha seo, con la capilla de la Trinidad y la girola, donde se sitúa la capilla llamada de la Corona, se construyó entre 1174 y 1220. Algunos de los vitrales de ambas capillas han resultado afectados. Se han abierto agujeros que han perforado los paneles, dejándolos bastante porosos, con lo que la lluvia ácida alcanza la superficie interior del vidrio deshaciendo la labor pictórica.

Francia es el país tradicionalmente depositario de la tradición de las vidrieras pintadas. Una catedral singular, la de Chartres, está decorada con más de 2000 metros cuadrados de vitrales de los siglos XII y XIII, período en que dicho arte alcanzó su cima en ese país. Hace apenas veinte años uno podía maravillarse con los vitrales, particularmente con la riqueza obtenida en los paneles, en su mayor parte azules, del románico y principios del gótico. Era el "milagro azul" de Chartres. Hoy el contraste es descorazonador y ello a pesar de que el azul no ha perdido del todo su intensidad. En realidad, la composición química de los vidrios azules ha sido relativamente resistente a la intemperie. Los paneles de otros colores, por el contrario, se han corroído y se han tornado marrones, haciendo casi irreconocibles las imágenes. En los países de lengua alemana han sido, sin embargo, los vidrios de color verde los menos dañados.

Los vitrales medievales son construcciones de extremada fragilidad. Cada uno de ellos consta de numerosas piezas de vidrio coloreado, de diversa composición química, unidos en una estructura firme, aunque elástica, con delgadas tiras de plomo ranuradas, que sirven para sostener los vidrios. La red de tiras sigue las líneas de la composición, produciendo una imagen única, a la manera de un mosaico. En la mayoría de los casos el vidrio fue coloreado con óxidos metálicos, que fueron incorporados en la masa fundida en el momento en que se manufacturaba el vidrio. Una excepción a este sistema fueron las vidrieras "bañadas", en las que una delgada película de color, generalmente rojo, se fundía sobre un vidrio transparente. Efectos de detalle se podían obtener raspando algunas zonas de la película de color. A comienzos del siglo XIV, comenzó a introducirse el color plata, consistente en disolver nitrato de plata en arcilla u ocre. El color se aplicaba sobre la cara exterior del vidrio, metido posteriormente al fuego para darle la cochura final. Se conseguía un color que iba desde el amarillo limón claro hasta el naranja intenso. Por último, a mediados del siglo XV, se introdujo la sanguina. Este es un pigmento que contiene sulfito de hierro. Aplicado a la superficie externa del vidrio toma, una vez metido al fuego, una coloración que va del rosa al rojo marronáceo.

La decoración del vidrio coloreado se obtuvo, en primer lugar, mediante la técnica pictórica conocida por grisalla, aplicada a la superficie del vidrio. Nor-



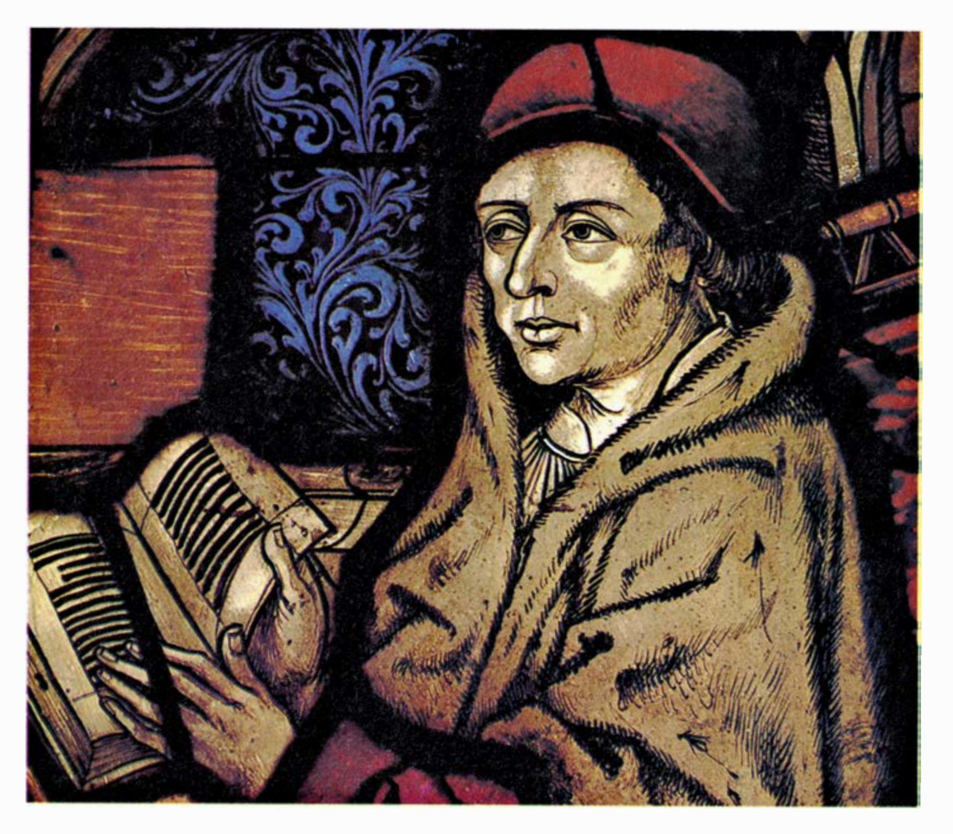


1. DAÑOS OCASIONADOS A LAS VIDRIERAS MEDIEVALES. Adquieren formas diferentes, según la composición del vidrio y las condiciones atmosféricas a que estén expuestas. El panel de la izquierda representa a Adán y pertenece a la gran vidriera occidental de la catedral de Canterbury, realizada en torno a 1180. La polución y el elevado grado de humedad permanente han afectado al vidrio, que en algunos lugares ha quedado perforado como si fuera un colador. Los daños son evidentes en los vidrios correspondientes a las encarnaduras, en la cabeza y cuerpo de Adán. El panel de la derecha, que representa a tres guerreros, es de la catedral de San Patrokli en Soest, Alemania; fue realizado con anterioridad a 1166. Durante siglos la superficie del vidrio ha ido oxidándose. Las zonas con labores a línea y con medios tonos estuvieron protegidas cierto tiempo. Pero cuando la pintura se desprendió, permaneció una imagen en negativo. Los daños son especialmente visibles en los rostros, mientras que los paneles de color verde han resistido mejor.

malmente, la pintura se ejecutaba en negro o en un color oscuro neutro. La propia pintura era una mezcla de óxido de cobre o de hierro –que incorpora a la mezcla un color negro, marrón o gris verdoso–, vidrio pulverizado –lo que permite que la pintura funda con la superficie del vidrio cuando el panel es metido al fuego– y un agente endurecedor –como una mezcla de vino y goma arábiga, extraída de la acacia–. La pintura se aplicaba a la manera de líneas opacas, como superficies traslúcidas o por capas. El sombreado podía reforzarse pintando tanto la superficie interior como la exterior del vidrio. Las capas pictóricas podían ser posteriormente aligeradas con delicados toques de pincel o raspando con un punzón o con el cañón de una pluma. Cualquiera que admire de cerca por vez primera una vidriera no puede por menos que asombrarse de la precisión de los detalles y de la sutileza empleada en unas obras de arte destinadas a ser vistas a gran distancia. El paso final en la preparación de las piezas de vidrio era meterlos al fuego a una temperatura cercana a los 600 grados Celsius, temperatura a la que la superficie del vidrio se reblandece y funde la pintura depositada sobre la misma.

Desde el momento en que los paneles se situaban en un emplazamiento se encontraban en peligro. Como amenaza más inmediata no sólo hay que incluir los efectos del granizo, los huracanes y las fluctuaciones de la temperatura, sino también la destrucción gratuita, como la provocada por pedradas. Durante la Edad Media, las instituciones religiosas contrataban habitualmente a vidrieros para el mantenimiento de sus vitrales. Los cuidados consistían en la limpieza –lavándolos con agua, carbonato de sosa y una esponja–, en la reparación del emplomado y en la sustitución de los paneles destrozados.

Aparte de estas amenazas externas, el propio vidrio era susceptible de sufrir un proceso de descomposición. El vidrio medieval se realizaba con materias primas locales, generalmente mezclando una parte de arena y dos partes de cenizas de madera de haya o de helecho. Esta mezcla tenía la ventaja de fundirse fácilmente. El vidrio tenía, sin embargo, el inconveniente de ser blando, una característica que lo hacía susceptible a los cambios atmosféricos. El proceso de descomposición se iniciaba en cuanto se colocaba a modo de paneles de ventanas. La lluvia o rocío sobre





2. ESTOS PANELES de suerte dispar corresponden a Michael Wohlgemuth, el maestro de Alberto Durero. La vidriera superior, que representa a Lorenzo Tucher, donante de la misma, pertenece a la iglesia de San Miguel en Fürth y se ejecutó en el año 1485. Su exposición a la intemperie no la ha dañado. En 1815 fue vendida a un coleccionista. Por último, en 1968, el Museo Nacional Alemán de Nuremberg la adquirió. El vidrio se ha conservado libre de corrosión, por lo que las labores pictóricas a línea se encuentran completas. La vidriera inferior, que representa al emperador Heraclio entrando en Jerusalén, es propiedad de la iglesia de San Lorenzo de Nuremberg y se realizó entre 1476 y 1477. En el siglo pasado fue objeto de una restauración que sólo consiguió dañarla aún más. Muchas partes del panel son copias decimonónicas de los fragmentos originales. El rostro del emperador y el del personaje situado junto a él se han astillado en cientos de piezas. Si parecen intactos débese a que ambos han sido laminados.





3. DETALLES DEL DETERIORO de las vidrieras medievales. Las tres fotografías corresponden a distintos fragmentos de una que representa a la Virgen, realizada en torno a 1385 para la iglesia de Santa Marta de Nuremberg. Las fotografías muestran, a tamaño casi natural, el vidrio azul del manto de María (*a la izquierda*), el rostro de Nuestra Señora (*al centro*) y un modelo ornamental pintado sobre vidrio rojo (*a la derecha*). En cada uno de ellos, la corrión ha dañado el vidrio, confiriéndole una apariencia craquelada. La corrosión exfolia la superficie, menguando así el grosor de los paneles.

la superficie de los paneles hidrataba el material vítreo. En particular, los iones de hidrógeno del agua podían reemplazar a los iones alcalinos del vidrio, especialmente a los de potasio y calcio. Los iones de hidróxido (OH), procedentes del agua, podrían entonces afectar a la sílice (SiO_2) del vidrio, transformándolo de polímero en un gel, un material amorfo constituido por pequeños fragmentos de sílice. Finalmente, al desaparecer los álcalis, sólo permanecía la sílice, cuya presencia puede afectar, de manera especial, al aspecto de las vidrieras. Las capas de sílice pueden tornarse iridiscentes, y así los paneles se volverían cada vez más opacos.

Desde comienzos del siglo XIX las amenazas, interiores y exteriores, sobre las vidrieras se han visto incrementadas debido a los peligros producidos por la industrialización. El principal elemento nocivo es el dióxido de azufre, vertido a la atmósfera no sólo por los procesos de fabricación, sino también al quemar carbón y petróleo. El dióxido de azufre en combinación con la humedad origina el ácido sulfúrico, que aumenta la disponibilidad de los iones de hidrógeno. Además, esto confiere capacidad al grupo de los sulfatos capaces de reaccionar con las sales, tales como el calcio. Las capas terrosas de sulfatos originan una costra que puede tener varios milímetros de espesor. La costra es altamente higroscópica –absorbe agua como una esponja–, con lo que se acelera la destrucción del vidrio. El análisis químico demuestra que la destrucción originada por el dióxido de azufre no tarda más de 10 o 20 años. La rapidez de la destrucción puede documentarse comparando los paneles de una misma ventana cuando algunos permanecen "in situ" y otros se han trasladado a un museo.

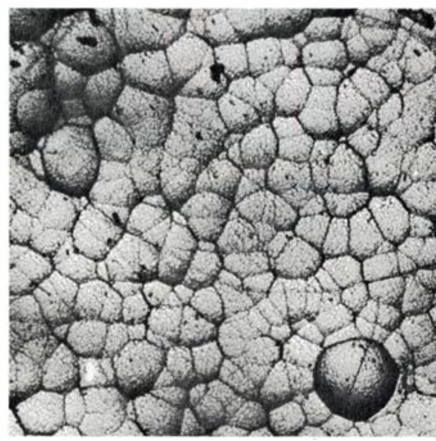
La duración de una obra medieval en vidrio depende de la combinación de varias circunstancias: de la composición química del vidrio, del óxido metálico empleado como agente colorante, de la temperatura a que se fabricó y del lapso de tiempo en que se mantuvo el fundido durante la manufactura. La temperatura es un elemento crucial. Recientes estudios han señalado que el punto de fundido del vidrio medieval oscilaba entre los 300 y los 900 grados Celsius. El vidrio de época románica, el realizado más o menos entre el año 500 y el 1150, tiene un punto de fusión elevado. Sin embargo, el vidrio de época gótica, correspondiente al fabricado entre el 1150 y el 1550, tiene un punto de fusión más bajo. (El vidrio fabricado con posterioridad, durante el Renacimiento, tiene el punto de fusión más alto de todos.) En general, el vidrio con fusión a altas temperaturas es el más resistente a la acción del medio. La temperatura que se necesita para la fabricación contribuye a asegurar que la composición sea homogénea y a dotarla de una superficie bien formada y pulida, que previene contra la adherencia de la corrosión.

Esto no significa que un punto elevado de fusión sea una ventaja absoluta. Las partículas de vidrio existentes en la pintura utilizada para las líneas y los medios tonos funde a una temperatura próxima a los 600 grados Celsius. Si el punto de fusión del panel es sustancialmente mayor, la fusión entre los dos es deficiente. El resultado a lo largo del tiempo es especialmente evidente en los vidrios del Renacimiento. El propio vidrio apenas resulta corroído, mientras que la pintura se conserva con dificultad. Indudablemente, los pintores de vidrio medievales conocían la imperfecta fusión que ocurría entre su pintura y el vidrio, que tenía un punto de fusión más elevado. No obstante, parece que en ocasiones se esforzaron por resolver el problema. En el *Diversarium artium schedula*, un manuscrito fechable entre 1110 y 1140, el monje alemán Teófilo daba instrucciones a los vidrieros para que extrajesen el vidrio del horno y "ver si podían raspar los pigmentos con sus uñas, lo que sería índice de que deberían devolverlos al fuego, o si por el contrario eran resistentes, lo que indicaría que ya estaban listos".

Algunos aspectos del proceso medieval de cocido son de cierta importancia para los conservadores que se afanan en la actualidad en la salvaguarda del vidrio. Las piezas, una vez dispuestas para cocerse, solían apilarse en capas









4. MICROFOTOGRAFIAS de los vitrales que nos ofrecen más detalles de los daños. La superior izquierda corresponde a los cráteres abiertos en la superficie de un vitral de la catedral de Augsburg. La imagen presenta un aumento de 25 diámetros. La situada arriba, a la derecha, representa el fondo del cráter, en el que se muestra el avance de la descomposición por acción de la humedad. El aumento es de 1000 diámetros. La descomposición de la superficie de un vidrio del monasterio de Lorsch en Alemania (*abajo, a la izquierda*) ha dejado al descubierto los daños del estrato inferior del mismo. El aumento es de 10 diámetros. Profundas fisuras se han abierto en un vidrio de la iglesia de Lautenbach en Francia (*abajo, a la derecha*). La tersura de la zona superior derecha corresponde a la superficie primitiva: 600 aumentos.

en el horno. De esta manera, la pintura que se evaporaba ligeramente de la superficie de una pieza, en el curso de la cocción a alta temperatura, producía una débil impregnación metálica sobre las piezas almacenadas arriba o abajo; impregnación que, en su momento, restaba invisible. Pero reducía la susceptibilidad de corrosión. La Coronación de la Virgen, representada en la vidriera de los Mártires de la Catedral de Friburgo, puede servir de ejemplo. Cristo, que está sentado cerca de su Madre, lleva una corona apenas perceptible y que parece como reflejada en un espejo, detrás de la cabeza de María. El área impregnada está intacta y el vidrio sin corroerse. Sin embargo, el resto está cubierto por una costra polvorienta.

Aunque los peligros que afrontan las vidrieras son hoy graves, el problema de su deterioro tiene una larga historia. En tiempos de la Reforma, en que se rechazó la ornamentación sagrada, se interrumpió el arte de los vitrales. Algunos de ellos se arruinaron. (En 1639 Adam Gering, contemplando la Catedral de Friburgo, se quejaba: "¡Qué terriblemente dañados están estos hermosos vitrales!".) Algunos paneles perdieron transparencia hasta el punto de que se sustituyeron determinadas zonas por vidrios más claros para incrementar la luminosidad interior del edificio. El Barroco y la Ilustración, con su escaso interés hacia los vestigios medievales, sólo contribuyeron a incrementar el abandono. ("Porque estas vidrieras coloreadas hacen las cosas oscuras, opresivas y sombrías, hay que deshacerse de ellas en todas partes", indicaba un sacerdote de la catedral de Friburgo en 1787.)

A comienzos del siglo XIX se reavivó el interés por los vitrales. Desgraciadamente, una ambición equivocada por superar a los viejos maestros ocasionó una segunda oleada de destrucción. Por toda Europa una nueva generación de vidrieros se ocuparon de lo que ellos mismos llamaban "restauración". Los paneles deteriorados se sustituyeron por otros. Se repintó y recoció las grisallas dañadas. En muchas ocasiones los paneles originales desaparecieron, sin duda acaparados por los coleccionistas. A fines de siglo las prácticas cambiaron. El entusiasmo decayó y el dinero escaseó. Desde entonces, los originales deteriorados no fueron reemplazados por copias. Antes bien, se trocearon los paneles originales y los fragmentos se insertaron en sustitución de los paneles dañados.

Los comienzos del siglo XX conocieron muchísimos tratamientos experimentales y tanteos. Así, en la primera década de la centuria, los paneles de la iglesia de San Sebaldo de Nuremberg fueron cubiertos por un ligero barniz con fusión a baja temperatura, un esmalte especial, y recocidos para sujetar la grisalla. El daño ocasionado por tal procedimiento fue grave, lo que no impidió que el tratamiento se aplicara a más de 200 vidrieras hasta 1939.

¿Cómo hay que conservar y restaurar, pues, las vidrieras? El ejemplo de la iglesia de San Lorenzo de Nuremberg demuestra que en cada caso particular la restauración ofrece problemas peculiares. En ella la corrosión causada por la polución se inició a fines de la Edad Media, pues junto a la iglesia los habitantes de Nuremberg trataban el lúpulo con azufre. Los daños ocasionados a las vidrieras fueron graves. A fines del siglo XV el Ayuntamiento designó al famoso artista Hirsvogel el Viejo como vidriero oficial de la ciudad. Cuatro siglos después, las vidrieras de la iglesia fueron objeto de una "restauración". Entre 1829 y 1840 el pintor de vidrieras Johann Jakob Kellner y sus cuatro hijos eliminaron los paneles deteriorados de cinco de las vidrieras de la cabecera y los sustituyeron por copias o por nuevas creaciones. Las originales se redujeron en un 40 por ciento. El paradero de los originales se desconoce en gran parte. Algunas piezas salieron al mercado de arte y otras pasaron al Museo Nacional Alemán de Nuremberg. El examen de algunas piezas aún existentes demuestra que no estaban suficientemente dañadas como para exigir su eliminación.

La polución del siglo XX intensificó el deterioro de las vidrieras de la iglesia de San Lorenzo. El arquitecto, hijo de un pintor de vidrieras, Joseph Schmitz, inició una serie de investigaciones para

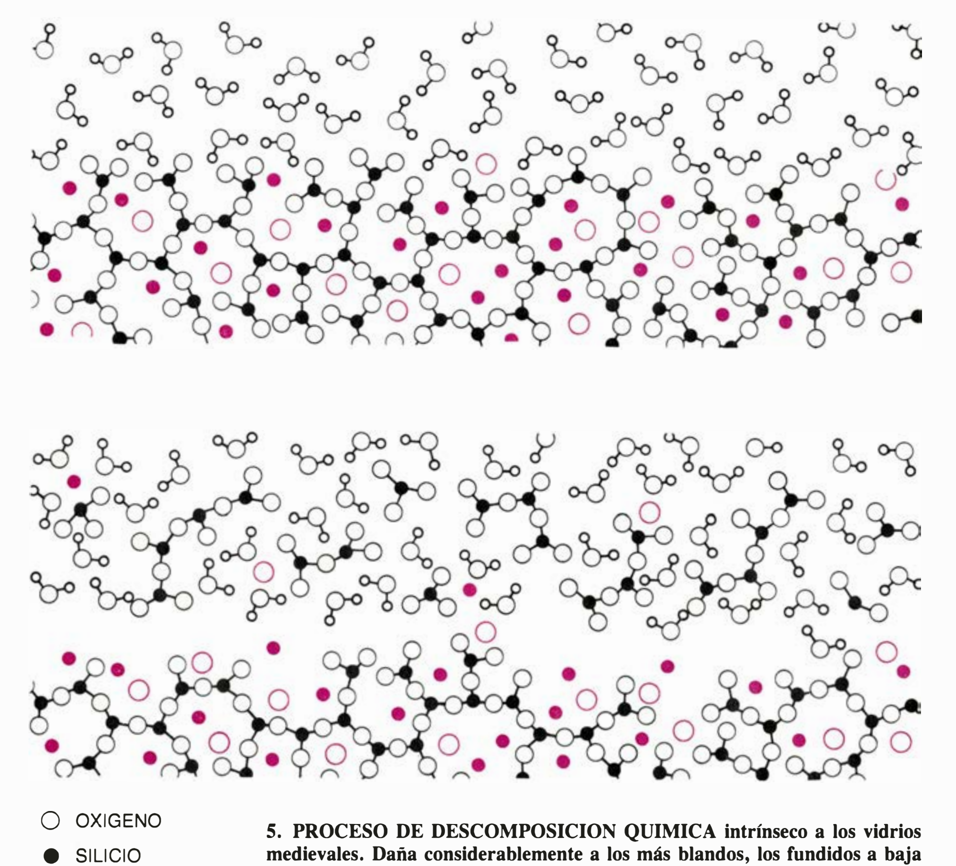
lograr un método eficaz de conservación de las vidrieras. En 1917, después de varios años de experimentación, se eligieron algunos paneles de la iglesia de San Sebaldo de Nuremberg para someterlos a tratamiento. Dichos paneles se desensamblaron, cubriéndose las piezas con un polvo vítreo que, sometido al fuego, producía una sobrecristalización. Dos décadas más tarde, el Departamento del Estado de Baviera para la Conservación decidió emplear el método, a gran escala, en la iglesia de San Lorenzo. La superficie exterior de muchos vidrios de diferentes tipos de las ventanas de dicho recinto estaban profundamente corroídos. Una gruesa costra hacía los paneles casi opacos. La grisalla apenas se conservaba en la cara interna de las vidrieras, cayéndose en escamas.

Los conservadores eliminaron la costra por abrasión y aplicaron un esmalte vítreo con fusión a baja temperatura. La superficie interna también se limpió y revitrificó, tras haber fijado cuidadosamente las grisallas con un papel secante. Los trabajos comenzaron con la ventana Konhofer, una obra fechable en 1477, creación del taller de Michael Wohlgemuth, el maestro de Alberto Durero. Bien pronto se advirtió que la baja temperatura elegida para someter la obra al fuego no era la adecuada para conseguir la fusión de la pintura y el vidrio. Entonces se incrementó la temperatura, con lo cual se fundió la grisalla. Pero, además, se produjo una decoloración verdosa que hizo borrosa la pintura. Al mismo tiempo, las piezas de vidrio que tenían un alto contenido de hierro y manganeso, entre ellas las de coloración de las encarnaduras, se volvieron marrones oscuras. El tratamiento continuó a pesar de todo, hasta que se suspendio con la declaración de la segunda guerra mundial.

La reanudación en 1968 de los esfuerzos conservadores de las vidrieras, en mi estudio y en el Instituto para la Conservación y Restauración de vidrieras de Nuremberg, demostró la verdadera gravedad del daño. El recalentamiento y posterior enfriamiento de los vitrales de San Lorenzo los habían sometido a una tensión térmica que habían ocasionado su fractura y en muchos sitios su total destrucción. Por otra parte, en el revidriado se habían originado burbujas y éste se había corroído más rápidamente que el vidrio original. El revidriado pudo eliminarse con un cepillo de fibra de vidrio, pero la pintura resultaba nuevamente desprotegida.

Durante los años cincuenta se reconstruyó la propia iglesia. En el curso de los trabajos, Richard Jakobi, entonces director del Instituto Doerner, se encargó de la protección de los vitrales de la iglesia. En concreto, intentó emparedar cada panel entre dos hojas de vidrio, pero separando el original de las de cobertura mediante un plástico autoadherente. El sistema se había intentado antes con resultados decepcionantes en un panel de la catedral de Naumburg en 1939. De nuevo se extrajeron los paneles de sus soportes. Las astillas de cada hoja de vidrio fueron encoladas por sus bordes y reensambladas. (La mayor parte de las hojas estaban astilladas en fragmentos de escasos milímetros.) Posteriormente se hizo un modelo en arcilla y yeso de cada lado de las hojas. Dos vidrios de unos ocho milímetros de espesor se cortaron con la forma de cada hoja, colocándose en los moldes y siendo sometidos a una temperatura entre 700 y 800 grados, con lo que se obtuvo el contorno de la superficie de los originales. Por último, el vidrio original se emparedó entre las dos hojas nuevas. Las láminas de vidrio se encolaron, a una temperatura de unos 200 grados, a hojas de plexigum, un material acrílico blando.

El procedimiento resguardaba los vitrales de la polución atmosférica, de la humedad, de las tormentas y del granizo. Sin embargo, el sistema tenía cuatro importantes inconvenientes que determinaron su rechazo. En primer lugar, la aplicación de una tapa de vidrio y una hoja de plástico en la cara interior produce el efecto de un cristal mojado, una tendencia a reflejar la luz que resta visibilidad a las superficies pintadas en sutiles medios tonos. En segundo lugar, la fabricación de un molde sin haber fijado primero la labor pictórica es desafortunada, porque una parte sustancial de esa pintura suelta se pierde. La subsiguiente laminación de los paneles originó también daños a la pintura. En tercer lugar, el calentar el emparedado de vidrio a unos 200 grados puede dañar, en última instancia, al vidrio. Por ejemplo, es posible que las presiones interiores originadas por el calor puedan conducir a la desintegración. Finalmente, el uso en restauración de nuevas materias plásticas cuyo comportamiento se desconoce es, en potencia, perjudicial. En la iglesia



5. PROCESO DE DESCOMPOSICION QUIMICA intrínseco a los vidrios medievales. Daña considerablemente a los más blandos, los fundidos a baja temperatura, que se fabricaron durante ciertos momentos de la Edad Media. El agua, en forma de lluvia o de rocío, ataca al vidrio de dos maneras diferentes: liberando iones alcalinos, principalmente de potasio y de calcio, y despolimerizando la cadena de sílice (SiO_2). Finalmente, sólo la sílice permanece en la superficie del vidrio (*esquema inferior*). La sílice en capas dispersa la luz.



6. SAN AMBROSIO FUE REPRESENTADO por Wohlgemuth en el año 1477 en la iglesia de San Lorenzo de Nuremberg. Desde entonces, la historia del vitral ha resultado especialmente desafortunada. En 1836, el pintor de vidrieras y restaurador Johan Jakob Kellner reemplazó la banderola donde aparece escrito el nombre del santo. Un siglo más tarde se advirtió que toda la labor de líneas se había desprendido, pues se había arruinado por la corrosión. Un intento de fijar la pintura mediante el recocido del vidrio sólo sirvió para derretir y emborronar las líneas de contorno. Además, el vidrio blanco adquirió un tono ocre y el empleado en la túnica del santo, que había sido azul, se volvió negro. Los delicados detalles pintados son visibles en la actualidad únicamente como si se tratara de una imagen en negativo.

de San Lorenzo se produjeron daños reales. Bajo el efecto de los rayos ultravioletas del sol, el plástico utilizado para unir los fragmentos rotos se ha vuelto marrón oscuro.

En 1982, mis colegas y yo deshicimos la laminación. Nuestro deber primordial, a lo largo de todo el cuarto de siglo en que he dirigido la restauración de los vitrales de la iglesia de San Lorenzo, ha sido tomar las medidas profilácticas adecuadas para crear unas condiciones similares a las de un museo.

La primera etapa de nuestro trabajo consistió en la limpieza del vidrio. No se pretendía tanto mejorar la transparencia de los vitrales cuanto eliminar los nocivos elementos generadores de la corrosión: la costra que atrae la humedad. Además, la limpieza mostraba lo que se había perdido de la pintura, con lo que su estado de conservación podía determinarse con precisión. Se volvieron a fijar las zonas de pintura desprendidas, pues de lo contrario se hubieran perdido. El fijado se efectuó con un material acrílico que no amarillea y que puede eliminarse por futuros restauradores. El siguiente paso fue la restauración. No existe un procedimiento garantizado, seguro y universal; cada obra en vidrio requiere un tratamiento propio.

Además, hay dos formas de proteger el vitral. La primera consiste en colocar un panel de vidrio protector, sin unirlo a dicho vitral. La segunda controlando, como si estuviera en un museo, la temperatura y la humedad existente entre el panel protector y el vitral. La idea consiste en obtener un ambiente amortiguador entre la atmósfera exterior y la superficie del vitral. Después de todo, el principal factor generador de la corrosión de los vitrales es la humedad. Sin humedad, la propia concentración elevada de dióxido de azufre de la atmósfera puede resultar soportable.

El sistema más antiguo conocido de doble vidriera protectora se instaló en la catedral de York, en Inglaterra, en 1861. El propósito del mismo no fue otro que dotar al edificio de un aislamiento contra el frío. Tal protección de los vitrales contra la intemperie se comprobó, con posterioridad, que había sido beneficiosa. Sin embargo, esa defensa resultaba antiestética. Se efectuó en forma de grandes láminas verdosas con aspecto de vidrio y fabricadas a máquina. Situadas entre los vitrales y el exterior, los nuevos "vidrios" no sólo molestaban la visión del edificio desde fuera, sino que también disminuían la luminosidad de las vidrieras vistas desde el interior. Más aún, las láminas protectoras habían sido fijadas con mortero y la tensión resultante de su dilatación las había roto, salvo una, después de 45 años.

Un segundo experimento con doble vidrio protector se efectuó en 1897. En esta ocasión se trabajó en el ciclo de vidrieras románicas de la pequeña iglesia de Lindenau, hoy en la República Democrática de Alemania. Dos paneles del mencionado ciclo han pertenecido durante casi 80 años al Museo Nacional de Alemania. Su estado de conservación es semejante al de los vitrales que todavía permanecen en la iglesia. La protección obtenida mediante el doble vidrio evidentemente coincide con las condiciones que se logran en un museo.

Aunque el doble vidrio protege el exterior de los vitrales, siguen existiendo amenazas para la superficie interior de los mismos, debido a la calefacción de las iglesias medievales. Como norma, las iglesias no fueron diseñadas para ser calentadas; carecían de aislantes en su pavimento, paredes, cubiertas y ventanas. Los resultados benéficos de esto es que la humedad relativa del interior del edificio ha fluctuado poco durante siglos. Los gruesos muros han servido de amortiguación, absorbiendo o eliminando la humedad. La calefacción, por el contrario, origina una diferencia de temperatura entre el interior y el exterior del edificio, especialmente cuando se sube rápidamente antes de celebrarse los cultos. La humedad del aire se condensa entonces sobre superficies mal aisladas, especialmente sobre la superficie de las ventanas. La humedad absorbe la polución atmosférica, con lo que se inicia la destrucción. Las grisallas y el propio vidrio empiezan a descomponerse. La superficie pintada, que durante un tiempo había protegido el vidrio inferior, se mantiene visible bajo el aspecto de una imagen en negativo.

El tipo de deterioro que origina la imagen en negativo se acompaña fre-

cuentemente de un proceso totalmente diferente de corrosión, cuyo mecanismo han puesto en claro las recientes investigaciones que hemos llevado a cabo en colaboración con el Museo Alemán de Munich. El proceso afecta principalmente al vidrio que tiene una alta proporción de hierro y manganeso (vidrio como el empleado durante el románico y principios del gótico). La lámina superficial es surcada por un gran número de microscópicas fisuras que permiten la penetración del oxígeno, la humedad y los ácidos. El resultado, en contraposición a la corrosión habitual que provoca una costra, es la eliminación de los electrones de elementos químicos tales como el hierro y el manganeso. El producto químico resultante, de color marrón oscuro, tiende a no disolverse. Esta es la causa auténtica del oscurecimiento y de la opacidad de las vidrieras. Hasta cierto punto, el proceso es reversible –en los lugares en donde no hay grisallas o pinturas– usando agentes reductores que anulen la oxidación.

La solución ideal, inviable en la mayoría de los casos, sería un control automático del clima, unido a una purificación del aire. Una solución menos extrema es la creación de un microclima alrededor de las vidrieras de la iglesia, independientemente de las condiciones que haya en otros puntos del edificio. El doble vidrio ayuda. El vidrio protector, hermético y situado en el emplazamiento de los vitrales originales, absorbe las fluctuaciones de la temperatura exterior y aporta una superficie a temperatura fresca. (Con baja temperatura en el exterior acumula humedad sobre la cara interior; a baja temperatura interior, retiene humedad sobre la cara exterior.) La vidriera emplazada junto a los vidrios protectores está expuesta al aire. Así permanece seca en ambas caras.

El "corpus" de conocimientos acumulados hasta el presente será de gran ayuda en futuros trabajos. Nosotros mismos, en colaboración con el Museo Alemán, estamos elaborando un catálogo de las vidrieras deterioradas en la República Federal, incluyendo obras de hasta más o menos 1520. Como parte del proyecto hemos seleccionado 30 emplazamientos y en cada uno hemos registrado, durante medio año, la temperatura local, la humedad y la polución atmosférica que afecta a las vidrieras medievales. Con ello se intenta salvaguardar una herencia que, de otra manera, podría pronosticarse como perdida dentro de nuestra propia generación.

Juegos de ordenador

Sobre las computadoras unidimensionales y los fenómenos irreductiblemente complejos

A. K. Dewdney

Inmersos como ahora estamos en el mundo de la computación artificial, vale la pena considerar la posibilidad de que nos rodee también un mundo de computación natural. Tal vez ordenadores hechos de agua, de viento, o de madera (por sólo citar unas cuantas posibilidades) pudieran estar borboteando, susurrando o creciendo tranquilamente sin sospechar nosotros que tales actividades se corresponden con una agitada y tumultuosa actividad computacional, cuya mejor descripción es precisamente ella misma. No se pretende con esto decir que los sistemas naturales efectúan cómputos en el sentido habitual del término, sino, tan sólo, que su estructura permite que la computación sea una actividad latente.

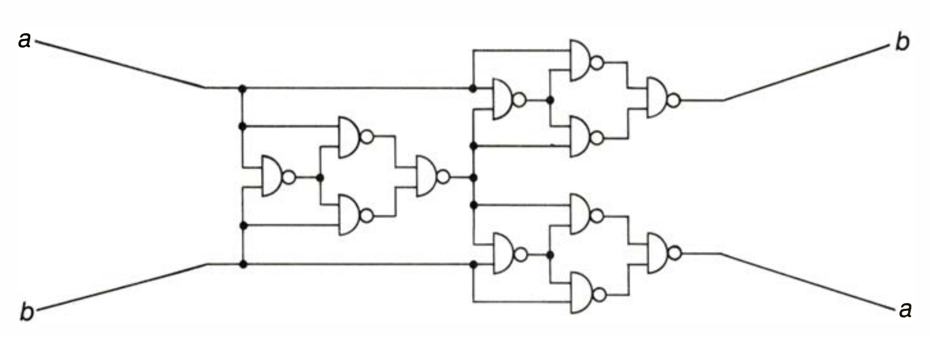
Elocuente representante de estas concepciones es Stephen Wolfram, físico teórico del Instituto de Estudios Avanzados, de Princeton. Wolfram señala que el flujo turbulento de un fluido, o el crecimiento de una planta, constan de componentes bastante simples, cuya conducta conjunta es tan compleja que probablemente no pueda reducirse a un enunciado matemático; su mejor descripción es ella misma. La irreductibilidad de un sistema natural podría ser consecuencia de una demostración de su capacidad para almacenar, transmitir y manipular información; es decir, de su capacidad para computar. En el número de noviembre de 1984 de INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, Wolfram da cuenta de cómo pueden utilizarse autómatas celulares para explorar tal posibilidad. Wolfram propone hallar un autómata celular capaz tanto de computar como de remedar un sistema natural. La búsqueda de Wolfram se concentra en los más sencillos de todos los autómatas celulares posibles, a saber, los que solamente tienen una dimensión.

Están formados tales autómatas por elementos simples, que se combinan para generar complejidad. Wolfram sugiere que, emboscados entre ellos, se encuentran computadoras auténticas, inmensas formaciones de células parpadeantes, que mudan de un estado a otro, capaces de producir profusamente cualesquiera cálculos que pueda llevar a cabo un ordenador tridimensional. Wolfram, que se halla rebuscando entre la miríada de autómatas celulares unidimensionales, no pondría reparos a reclutar para esta osada y compleja tarea la ayuda de voluntarios. Describiré seguidamente con mayor detalle en qué consiste tal búsqueda, y sus consecuencias en lo tocante a la posibilidad de computadoras naturales.

Antes de embarcarnos en tal aventura, se invita a los lectores a realizar una breve travesía (computacionalmente hablando) desde la tierra de las tres dimensiones hasta los increíblemente estrechos confines de una dimensión. Tenemos buen punto de partida en los ordenadores tridimensionales, los mismos que hoy habitan en nuestras oficinas, fábricas y hogares. Constan de elementos francamente sencillos, conectados y enlazados de modos muy complejos. No me refiero ahora a los dispositivos de ingreso y egreso de datos que la máquina pueda tener, sino a su corazón mismo, una diminuta laminilla de silicio que alberga miles de puertas lógicas, elementos de memoria, registros y otros componentes, conectados todos ellos por un elegante trazado de minúsculos hilillos. Aunque los circuitos están adheridos a una superficie de silicio, no por ello puede decirse que sean bidimensionales. Para empezar, cuando dos conexiones se cruzan, una de ellas tiene que pasar por debajo de la otra. Además, el sustrato de silicio de los microcircuitos interviene en el funcionamiento de todos los componentes lógicos.

Sólo podremos hallar computadoras bidimensionales en espacios de dos dimensiones, como por ejemplo, el "Planiverso" [véase "Bibliografía", al final de este número]. Está este dominio habitado por una raza de seres llamados "Ardeanos". Al parecer, los ardeanos han logrado construir con éxito una computadora bidimensional, utilizando tan sólo un único tipo de elemento lógico, que llamaremos "puerta NO-Y" (también llamadas puertas NAND). La salida de esta puerta es un 1 cuando al menos una de sus entradas es 0. No sólo es posible construir una computadora exclusivamente formada por puertas NO-Y, sino que con ellas puede resolverse el espinoso problema del cruce de conexiones. Los ardeanos han creado un circuito plano especial, integrado por 12 puertas NO-Y, tal que dos señales que lleguen por la izquierda en el orden *ab* salen por la derecha en el orden *ba* [*véase la figura 1*]. Por consiguiente, dos señales pueden cruzarse aun cuando las líneas de conexión no lo hagan. Por otra parte, el número de 12 puertas NO-Y parece un tanto excesivo, y los ardeanos quedarán reconocidos a los lectores que logren hallar un circuito más sencillo formado por puertas NO-Y que permita el cruce de señales.

Existe también un espacio bidimensional discreto, llamado Vida: un juego inventado por John Horton Conway, famoso matemático de Cambridge. Los lectores recordarán este cautivador ejercicio por los artículos de "Juegos matemáticos", de Martin Gardner. Recientemente, en diciembre de 1983, Brian Hayes exponía en esta misma sección cómo podría desarrollarse el juego sobre un estadillo electrónico. El juego de Vida es un reticulado bidimensional infinito de casillas cuadradas –células– cuyos estados guardan relación con los estados de las casillas vecinas. El tiempo también es discreto, y



1. Modo de lograr el cruce de señales en un ordenador bidimensional

progresa a golpes de reloj. En el intervalo entre dos latidos de ese reloj cósmico, cada una de las células se mantiene viva o muerta, de conformidad con un sistema de reglas muy sencillas:

Si una célula está muerta en el instante t, cobrará vida en el instante $t + 1$ si, y solamente si, exactamente tres de sus ocho vecinas están vivas en el instante t.

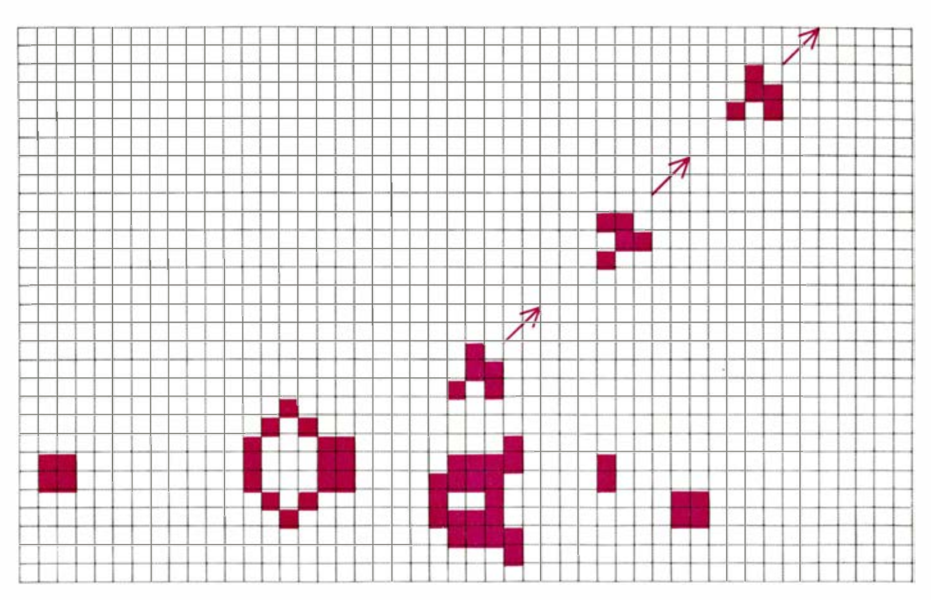
Si una célula está muerta en el instante t, morirá en el instante $t + 1$ si, y solamente si, menos de dos o más de tres de sus vecinas están vivas en el instante t.

Con este sistema de reglas, universalmente válido sobre la cuadrícula de Vida, una configuración inicial de células puede crecer interminablemente, puede caer en series cíclicas de configuraciones que se repitan periódicamente o puede acabar por extinguirse. Al cabo de más de un decenio de experimentación, efectuada por entusiastas del juego, ha quedado claro que Vida es un juego mucho más complicado de lo que nadie hubiera imaginado.

Para empezar, ha resultado que en el seno del espacio celular de Vida pueden construirse computadoras. Tal descubrimiento se efectuó gradualmente, a lo largo de unos cuantos años. En 1969, poco después de diseñar el juego, Conway descubrió una pequeña y curiosa configuración, que llamó *glider* (y que aquí denominaremos *deslizador*, o *patín*). Tras guiñar intermitentemente durante cuatro generaciones, recobraba su forma primitiva, pero en ubicación situada diagonalmente un cuadro más allá. Visto en la pantalla de un ordenador, cuando la ejecución del programa es suficientemente rápida, el deslizador parece una diminuta criatura tomada de una fantasía exobiológica, que fuera reptando por la pantalla, agitando la cola. El deslizador, o patín, viaja a la cuarta parte de la velocidad de la luz (en el espacio-tiempo celular).

Aunque en su día nadie se percatara, el patín proporcionaba un medio de comunicación utilizable en una computadora bidimensional en el seno de Vida: en lugar de utilizar impulsos eléctricos, hay que usar deslizadores.

La etapa siguiente en el proceso de construcción se cubrió en 1970, al descubrir R. William Gosper, Jr. y varios colegas un lanzador de patines [*véase la figura 2*]. Gosper, a la sazón alumno del Instituto de Tecnología de Massachusetts (MIT), ansiaba ganar los 50 dólares de premio que Conway había ofrecido en uno de los artículos de



2. El cañón lanza-patines de R. William Gosper

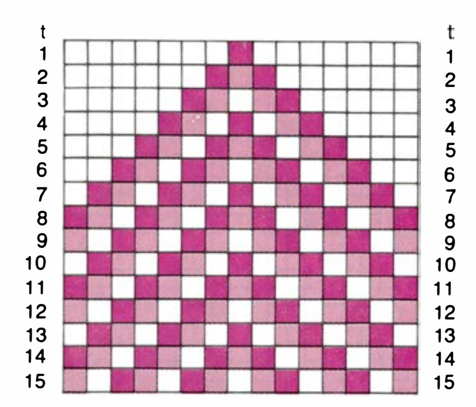
Gardner. El premio sería para quien primero demostrase concluyentemente la existencia de una configuración inicial de células capaz de crecer ilimitadamente. El cañón lanzapatines de Gosper proyectaba fuera de sí un nuevo deslizador cada 30 jugadas. El cañón y los patines proyectados formaban una población siempre creciente de células vivas.

Además de Gosper, había en el MIT otros estudiantes que dedicaban al juego de Vida su tiempo libre. Uno de ellos era Michael D. Beeler, a quien le resultaba especialmente grata la analogía entre Vida y la física de partículas. Beeler proyectó un haz de uno o más deslizadores sobre distintos blancos y anotó cuidadosamente los resultados, fastidiosos y aburridos a veces, espectaculares otras, de las colisiones. Llegó incluso a dirigir dos haces de patines unos contra otros, de diversos modos. Su constancia se vio recompensada con algunas observaciones útiles.

Una de las observaciones era que dos patines podían chocar y aniquilarse mutuamente. Ello apuntaba la construcción de la siguiente componente de un ordenador, las puertas lógicas. La más elemental es la puerta NO, que transforma una señal lógica en otra; una señal de entrada 0 se convierte en una salida 1, y viceversa. La construcción de una puerta NO en el juego de Vida es como sigue: se prepara un cañón lanzapatines que dispare en una dirección especificada. Los números binarios a introducir en la puerta NO se codifican en un segundo tren de patines, disparados en ángulo recto al primero. En el haz de entrada puede haber un patín (un 1) o no haberlo (un 0). El chorro intercepta al chorro emitido por el cañón, de modo tal que, cuando dos deslizadores chocan, se aniquilan mutuamente. Significa ello que cada patín del chorro de entrada perfora un agujero en el chorro expulsado por el cañón, convirtiendo en este proceso un deslizador (un 1) en un no-deslizador (un 0). La ausencia de un deslizador en el chorro de entrada dejará pasar intacto el deslizador emitido por el cañón. De este modo, el 0 queda convertido en 1. Vale la pena señalar que la puerta NO carece de estructura propiamente dicha: aparte del cañón lanza-patines, residente, se trata nada más que de un punto de encuentro entre los deslizadores [*véase la figura 4*]. La construcción de puertas de otros tipos, como las puertas de disyuntiva, O, y conjunción, Y, se basa también en la interferencia de haces de deslizadores, pero es demasiado compleja para explicarla aquí.

La memoria y los demás registros se construyen mediante la interacción de patines con configuraciones de cuatro células llamadas bloques. La posición de un bloque codifica un único *bit*, o dígito binario. El bloque puede desplazarse adelante o atrás por equipos de deslizadores. Bastan dos deslizadores, que tracen trayectorias adecuadas, para desplazar el bloque tres espacios en una dirección, tras hacer impacto en él. Después, diez deslizadores, elegidos con no menor cuidado, lo harán retornar a su lugar primitivo.

Hay mucho de ingenioso e interesante en el resto de la construcción. Toda ella cabe hallarla en el delicioso libro *Winning Ways for Your Mathematical Plays*, de Elwyn R. Berlekamp, John H. Conway y Richard K. Guy. El libro



3. *Lanza-patines en Rizo, un autómata lineal*

está dividido en tres secciones: juegos bipersonales, juegos unipersonales y juegos nulipersonales. El juego de Vida se encuentra en la última sección.

Al descender el último peldaño, el que nos lleva a una sola dimensión, sólo nos cabe examinar espacios celulares; resulta difícil imaginar cómo los ardeanos pueden reducir su ordenador a una mera línea continua. A primera vista, el espacio celular parece casi tan restrictivo como esa línea. Sin embargo, la restricción dimensional queda compensada por la libertad de no estar obligados a un único juego de reglas. Se nos da, en cambio, la oportunidad de confeccionar nosotros las nuestras propias. Hay otras compensaciones, emanadas de la simplicidad misma de tales espacios lineales, y de la posibilidad de observar cientos de generaciones de una sola ojeada. Basta situar una disposición inicial en una línea, e ir calculando en renglones las sucesivas generaciones, sea en una hoja de papel o en la pantalla de un ordenador. Se genera así un diagrama espacio-temporal.

Un autómata celular unidimensional (que en lo sucesivo llamaremos autómata lineal) es una tira infinita de casillas o células, cuyos estados cambian de conformidad con un juego de reglas dado. Lo mismo que en el juego de Vida, un reloj cósmico va marcando los tiempos; con cada golpe, cada célula adopta un estado, determinado por su estado precedente y por los estados anteriores de las células de su entorno. Un autómata lineal queda especificado al dar dos números, llamados k y r, así como un conjunto de reglas para deducir el estado inmediatamente consecutivo de las casillas. El primer número, k, determina cuántos estados distintos le están permitidos a cada casilla. En Vida hay dos estados solamente; así, k es igual a 2; entre los autómatas lineales que es preciso examinar, son frecuentes valores más elevados de k. El segundo número, r, alude a los radios de los entornos que se utilizan para calcular el siguiente estado de una casilla. El estado actual de las casillas, y los estados de sus r células vecinas por cada lado, determinan el siguiente estado de la célula. Por ejemplo, si r es igual a 2, y si k es igual a 3, una cierta regla pudiera especificar que cuando el vecindario de una célula fuese

0	2	1	1	0

el siguiente estado ocupado por la casilla central será

2

El conjunto de reglas que define un autómata lineal dado debe decidir la suerte que correrá cada casilla, para cada una de las posibles configuraciones de estados que habiten su vecindad. Dependiendo de los tamaños de k y r, el número de posibles reglas a examinar puede ser enorme. Por ejemplo, dados los modestos valores de k y r antes descritos, hay más autómatas lineales que átomos en el universo conocido.

Como es obvio, cada habitante de este planeta puede elegir para uso personal su propio autómata celular. Más aún, yo ya he reservado el mío. Por razones que pronto estarán claras, lo he llamado Rizo. Rizo consiente a cada célula asumir tres estados; cada vecindario consta de tres casillas, la central y las dos que la flanquean. Las reglas de Rizo son razonablemente sencillas y fáciles de programar:

1. Si una casilla se encuentra en estado 0, su siguiente estado será 2, siempre que los estados de sus flancos sumen 2 o más. En los demás casos, su estado inmediato será 0.
2. Si una casilla se encuentra en estado 1, su estado consecutivo será 0.
3. Si una casilla se encuentra en estado 2, su estado inmediato será 1 si al menos una de las casillas que la flanquean está en estado 0. En caso contrario, su próximo estado será 2.

Estoy seguro de que Rizo no va a desbancar a Vida; Rizo fue ideado con el objeto de ilustrar algunas de las posibilidades de mayor interés que ofrecen los autómatas lineales. Por ejemplo, Rizo dispone de deslizadores sencillos y, también, de un cañón lanza-deslizadores, más sencillo todavía. [*Véase la figura 3.*]

Supongamos que el espacio celular de Rizo se encuentra por completo en el estado 0, a excepción de dos casillas adyacentes. La casilla de la izquierda se halla en estado 2 y, la otra, en estado 1. En la generación siguiente, tal configuración se habrá desplazado una casilla hacia la izquierda. Este deslizador bicelular irá rizando, imperturbado, la recta, siempre hacia la izquierda. Intercambiemos los estados de las dos células, y se creará un deslizador que corre hacia la derecha. El cañón lanza-deslizadores consta de una única casilla en el estado 2. Esta casilla va pasando cíclicamente por los estados 1, 0 y, luego, nuevamente por el 2, emitiendo un par de deslizadores en cada ciclo. Me pregunto si alguien podrá hallar en Rizo un lanzador que emita deslizadores tan sólo en un sentido.

La simultánea activación de un par de tales lanza-patines produce extraños efectos. En el proceso de mutua aniquilación, las explosiones resultantes lanzan deslizadores, que salen proyectados en uno y otro sentido. Si los cañones están separados por número par de casillas, este número de deslizadores sale disparado en ambos sentidos a la vez. De lo contrario quedará en el centro un único cañón, que irá disparando deslizadores en chorro interminable.

Rizo no es más que uno de los autómatas lineales. ¿Qué decir de otros? El número de posibles reglas a tener en cuenta queda grandemente reducido adoptando las que Wolfram llama reglas totalísticas. En éstas, el estado inmediato de cada casilla queda determinado por la suma de los estados del entorno de la celdilla. A dicha suma participa el estado de la casilla considerada. El número de posibles sumas va de 0 a m, siendo m el producto del máximo de los valores de los estados por el tamaño del entorno. Si se especifica de qué modo determinan estas sumas el estado siguiente de la casilla central, el autómata lineal habrá quedado totalmente especificado.

Por ejemplo, veamos un autómata lineal muy interesante, gobernado por las reglas totalísticas dadas en esta tabla:

suma	5	4	3	2	1	0
estado siguiente	0	1	0	1	0	0

En este caso, k y r son ambas iguales a 2; los posibles valores de la suma de los estados de un entorno pentacelular

pueden variar de 0 a 5. Wolfram ha dado en llamar "número 20" a este juego de reglas, porque los valores designativos de los estados inmediatamente siguientes, que figuran en la tabla, son la expresión en base 2 del número 20.

Hay 64 diferentes modos de rellenar la segunda hilera de la tabla. Cada uno produce un autómata lineal; Wolfram los ha examinado en su totalidad. Inútil decirlo, para tal investigación resulta esencial disponer de ordenador. Para determinar el comportamiento de un autómata lineal dado, Wolfram crea una configuración inicial, compuesta por unas 100 células, cuyos estados se eligen al azar, y después deja suelto al autómata, para que actúe sobre ella. Para eliminar los efectos de las inmensas alineaciones de ceros que flanquearían por cada lado a la pauta de partida, Wolfram abrocha sus puntas izquierda y derecha; de este modo, la recta queda convertida en círculo, y su evolución histórica se desarrolla sobre un cilindro.

El resultado, empero, es el mismo que si la pauta aleatoria inicial se repitiese periódica e indefinidamente en ambos sentidos del espacio celular original. En cualquier caso, los efectos de los autómatas celulares sobre estas configuraciones iniciales aleatorias es de uniformidad sorprente. Cada autómata acaba encuadrado en una de las cuatro amplias clases construidas por Wolfram:

Clase 1. Al cabo de un número finito de generaciones, la configuración degenera en un único estado homogéneo, que se repite interminablemente.

Clase 2. La configuración evoluciona hasta convertirse en un cierto número de subpautas, que se repiten invariable o periódicamente.

Clase 3. La configuración no llega jamás a mostrar estructura alguna. El aspecto de los diagramas espaciotemporales es caótico.

Clase 4. En la configuración se desarrollan complejas subpautas localizadas, algunas de ellas muy duraderas.

De los 64 autómatas correspondientes al caso en que k y r son ambos iguales a 2, el 25 por ciento cae en la clase 1, el 16 por ciento, en la clase 2, el 53 por ciento, en la 3, y solamente un 6 por ciento pertenece a la cuarta. Wolfram sospecha que esta cuarta clase pudiera contener computadoras. Por ejemplo, el autómata lineal número 20 en binario se encuadra en la clase 4.

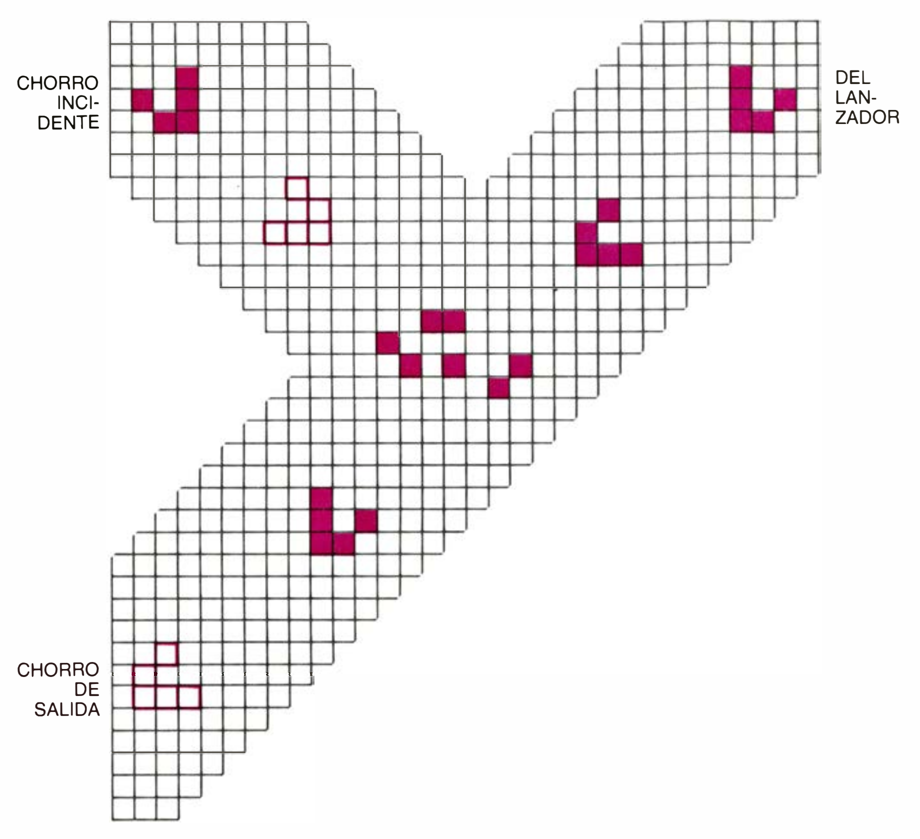
Como si quisiera animar a Wolfram a persistir en sus pesquisas, el autómata "20 binario" ha revelado de buena gana unos cuantos deslizadores. Son éstos los 10111011 y 1001111011. Ambos patines se deslizan hacia la derecha. Las reglas totalísticas siempre son simétricas; para obtener deslizadores que patinen hacia la izquierda basta, sencillamente, tomar estas configuraciones en orden retrógrado. ¿Existirá en el espacio "20 binario" un cañón que dispare tales deslizadores? A Wolfram le parece que sí. Hay, en cambio, otro espacio en el cual no he podido siquiera encontrar un deslizador. Se trata del espacio "792 ternario". Al calcular la expresión en base 3 de dicho número obtenemos un juego de reglas para un autómata de tres estados:

suma	6	5	4	3	2	1	0
estado siguiente	1	0	0	2	1	0	0

La búsqueda de deslizadores y de cañones lanza-patines se concentra en cierto número de autómatas lineales que se cree son computacionalmente universales. Con otras palabras, son éstos autómatas lineales capaces de actuar como un ordenador. Además de los autómatas "20 binario" y "792 ternario", ya comentados, tenemos el autómata biestado (r = 3, número de código binario 88), en el cual se ha encontrado ya un cañón lanza-patines.

James K. Park, alumno de la Universidad de Princeton, descubrió el cañón de dicho autómata. Los lectores que deseen presenciar el funcionamiento del cañón de Park habrán de preparar un programa sencillo que vaya mostrando en la pantalla las sucesivas generaciones de un autómata lineal, y generando a partir de cada generación la siguiente. Es cosa fácil materializar el autómata 88 mediante tal programa; cuando esté listo, introdúzcase como pauta inicial la secuencia 11111111-11011, y obsérvese cómo se expande y contrae. El cañón escupe un deslizador en cada sentido una vez cada 238 generaciones.

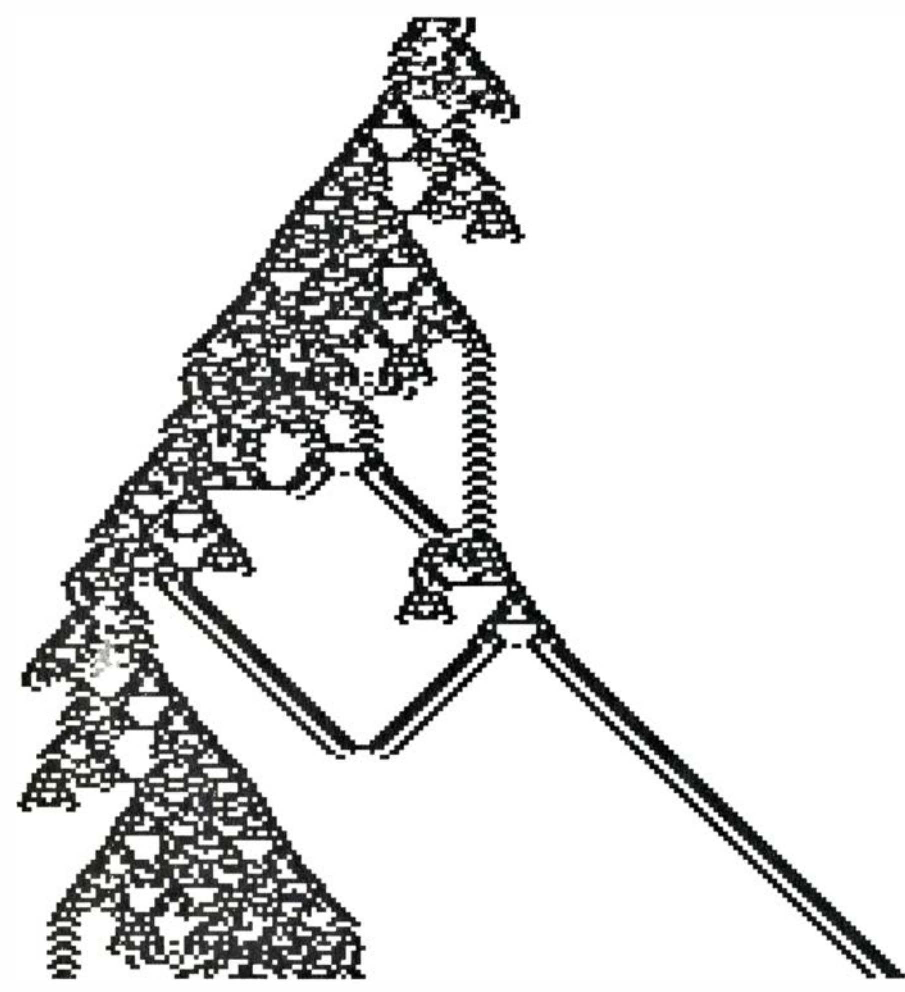
Se aconseja a los lectores que en lugar de programar autómatas concretos preparen programas que admitan como elementos de entrada reglas totalísticas arbitrarias. Resulta fácil para valores fijos de k y r, y casi igual de fácil aun dejando que estos parámetros tomen valores variables. Para las reglas utilizaremos una matriz específica, que llamaremos *tabla*; y para guardar las pautas nueva y antigua que en cada momento estemos procesando, usaremos



4. Una puerta NO *en Vida. Los patines presentes en el chorro incidente faltan en la salida*

dos matrices-fila (o *arrays* unidimensionales) que llamaremos *casinuevas* y *casiviejas*. Estas dos matrices-fila pueden ser tan largas como se quiera, pero téngase en cuenta que el dispositivo de visualización (dependerá de cómo sea) seguramente no pueda mostrar sino una porción reducida de tales alineaciones. Exhibamos, pues, la máxima porción central de *casinuevas* que nuestro dispositivo permita mostrar, y ejecutemos cíclicamente los pasos siguientes: Transfiramos el contenido de *casinuevas* a *casiviejas*. Recorramos, casilla por casilla, la matriz *casiviejas*; llegados a su i-ésimo elemento, sumemos los valores de todas las casillas, desde $i - r$ hasta $i + r$. Consultemos en *tabla* cuál es el valor de estado que corresponde a esta suma, y transfiramos el valor así hallado a la i-ésima de las *casinuevas*. A continuación, retornemos al ciclo de cómputo contenido en la fase de presentación, y repitámoslo. La presentación puede hacerse en líneas sucesivas, o estáticamente, en una sola. En el primer caso se produce un gráfico espaciotemporal; en el segundo, podremos presenciar una especie de película cinematográfica unidimensional.

Como ya hicimos notar, se dice que un autómata lineal es computacionalmente universal si hay una configuración inicial que en el sucederse de las generaciones sea capaz de actuar como un ordenador. Parte de la configuración de partida constituye la información de entrada; la salida consistiría en parte de alguna configuración posterior. ¿Resulta en verdad posible construir tal computadora a partir de materiales como cañones lanza-patines y otros diversos componentes de la maquinaria celular? Wolfram opina que sí. En uno de los autómatas lineales hoy objeto de investigación se han hallado deslizadores capaces de atravesar ciertas subpautas estables. Ello da esperanzas a la posibilidad de que la transmisión de información en el seno de un ordenador lineal no quede bloqueada por componentes no relacionados con tal información. Hay, además de Wolfram, otros investigadores empeñados en la experimentación con autómatas lineales. Kenneth Steiglitz, de Princeton, es uno de ellos, y ha descubierto deslizadores con propiedades análogas a los solitones. ¡Tales deslizadores pueden incluso pasar uno a través de otro!



5. Primer plano del lanzamiento unidimensional de James K. Park

¿Acabaremos por llegar a dar con estructuras persistentes capaces de trasladar, almacenar y manipular información en un dominio celular unidimensional? Posiblemente no. Tal vez el problema de la computación celular en una dimensión suponga algo intrínsecamente diferente, algo que nos exija contemplar la computación de modo enteramente distinto.

Wolfram ha dejado volar libremente su imaginación en lo tocante a la luz que los autómatas lineales pueden arrojar sobre el comportamiento de los autómatas en general y de cómo, a su vez, éstos nos facilitan la comprensión de procesos naturales. Supongamos que alcanzásemos a dar con un autómata que remedase de cerca algún proceso natural; por ejemplo, el flujo turbulento de algún líquido o gas, el movimiento de partículas sometidas a la influencia de fuerzas, o incluso, de un proceso biológico como el crecimiento. Supongamos, además, que el autómata resultase ser computacionalmente universal. En otras palabras, que, además de contener su espacio una estructura explícita capaz de computar, el mismo espacio contuviera implícitamente la computadora: todo intento de predicción del comportamiento del autómata estaría, por definición, tratando de predecir las acciones de un ordenador de tipo universal. En general, ello no resulta posible sino mediante un dispositivo del mismo tipo, es decir, otro ordenador de tipo universal. En consecuencia, no se dispondrá de atajo alguno para predecir el comportamiento del correspondiente sistema natural. Sus procesos serían computacionalmente irreducibles, en el sentido de que el mecanismo predictivo (ya sea una fórmula, ya un ordenador) ha de simular el sistema en cuestión más o menos directamente.

Conclusión que nos retrotrae a Rizo. Una población inicial de deslizadores que se desplazan en direcciones aleatorias chocan y rebotan unos contra otros. A veces sus colisiones producen un cañón lanzador, que genera nuevos deslizadores, y a veces sus colisiones no producen nada. Me sugieren una especie de universo unidimensional en miniatura, lleno de partículas elementales, viajando adelante y atrás. He invertido así el orden de búsqueda de Wolfram. A partir de un autómata cuyo comportamiento recuerda vagamente el de un sistema de partículas (y

para eso, bien insólitas), he soñado que Rizo es computacionalmente universal. Dado que se trata mi autómata personal, tal vez esté yo soñando solo.

El artículo de agosto sobre artefactos analógicos está produciendo tal diluvio de material procedente de distintas partes del mundo que merece la pena volver a tocar el tema, no obstante haber sido bisado ya en noviembre pasado.

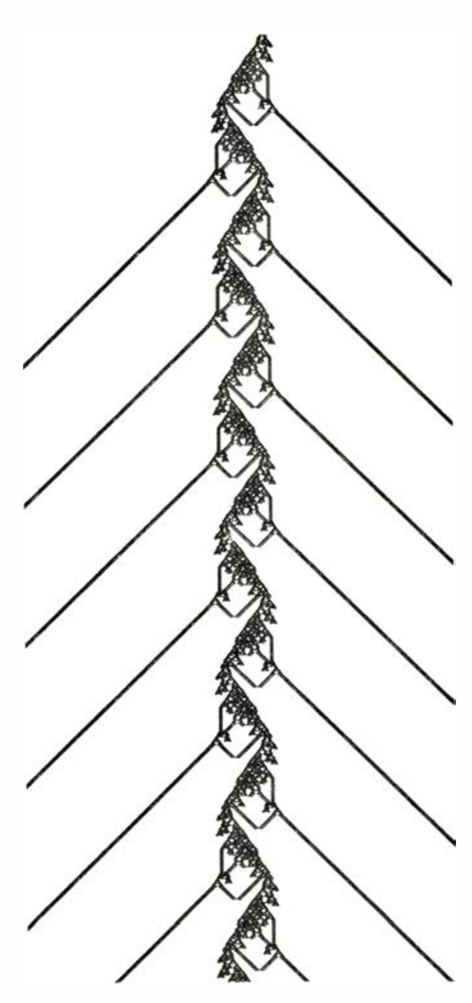
Vale la pena destacar la aparición de algunos artilugios de auténtico valor práctico. Al decir artilugios analógicos prácticos estoy refiriéndome a cosas como el sistema de control atmosférico descrito por Homer B. Clay, ingeniero consultor de Phoenix, Arizona. Los servicios de Clay fueron requeridos por un impresor, para el control de la humedad y temperatura en su planta de impresión. La temperatura y la humedad son de importancia crítica, porque afectan al estado del negro de carbón que se utiliza para recubrir unos grandes cilindros de cobre empleados en ciertos procesos de impresión. Un impresor ducho puede determinar si una lámina de negro de carbón es utilizable o no sujetándola y observando cómo se dobla al dejarla pender. Cuando la lámina no es utilizable (sea porque su contenido de humedad o su temperatura no son correctas) la lámina de carbón se arruga o agrieta. Clay diseñó un circuito más o menos convencional que detectaba la humedad y temperatura, y que ponía en marcha, o detenía, un sistema de atomizadores de agua. Al parecer, el sistema funcionó por breve tiempo, hasta que variables imprevistas lo dejaron fuera de servicio.

Un día, en que Clay volvió a la planta de impresión para evaluar el funcionamiento de su sistema de control, fue conducido hasta la sección de impresión por un ingeniero, socarronamente sonriente. A duras penas pudo Clay dar crédito a sus ojos: "Nuestro pequeño sistema se había desconectado, y en su lugar se encontraba una pequeña tira de negro de carbón, sujeta por un extremo al estante, y con el otro libre para moverse. Cuando su caída era la justa y precisa, el extremo libre cerraba un par de contactos, y ponía en servicio los atomizadores." El ingeniero de la planta me lo refregó aún más, añadiendo, "Funciona divinamente".

Allá por 1948, Robert Heppe, de Fairfax, Virginia, acababa de entrar, de ingeniero, en la fábrica que la Sylvania Electric Products Company tenía en Queens, Nueva York. La función de Heppe era ayudar a diseñar válvulas termoiónicas; el proceso que se seguía le pareció oneroso. El problema residía en que era preciso especificar por escrito el tamaño, forma y colocación de las rejillas y las placas de constitución de haces. A continuación, se elaboraba el diseño, produciéndose una única válvula, con la que se hacían las pruebas. El proceso podía requerir varios días. Su supervisor, Gerald Rich, mejoró enormemente el rendimiento del diseño, proponiendo cierto dispositivo analógico.

El artilugio consistía en una lámina de goma, un tarugo, unas cuantas piezas de madera contrachapada y varias cajas de mondadientes. La lámina de goma estaba sujeta por su borde a un gran aro, que representaba la sección transversal de la válvula, ampliada muchas veces. El cátodo consistía en un tarugo de madera que alzaba, como si fuera una tienda de campaña, el centro de la lámina. Los distintos diseños de rejillas se representaban mediante formaciones de palillos. Las rejillas polarizadas negativamente se materializaban mediante palillos que alzaban la lámina, a modo de tiendecitas, desde abajo; las positivas, hundiéndola mediante palillos, desde arriba. Otras características de la configuración se materializaban mediante piezas de contrachapado recortadas en la forma adecuada que empujaban la lámina desde arriba o abajo. Los electrones emitidos por el cátodo se simulaban mediante bolitas de rodamiento, que se vertían lentamente desde una lata situada sobre el tarugo. "Puede demostrarse", escribe Heppe, "que la pendiente de la goma de tal dispositivo representa el campo eléctrico, y que la altura representa diferencias de potencial en el espacio interelectródico... Las bolitas de rodamiento rodaban por la lámina, como en un juego del millón, reuniéndose, unas, en la placa, otras, en las rejillas positivas. Si no nos gustaba el número de las que llegaban a los diversos electrodos, o el modo en que se desplazaban, cambiábamos los elementos de sitio, o sus tamaños, etcétera, y volvíamos a ensayar". Las configuraciones más prometedoras se incorporaban a válvulas reales; se ensayaba en ellas.

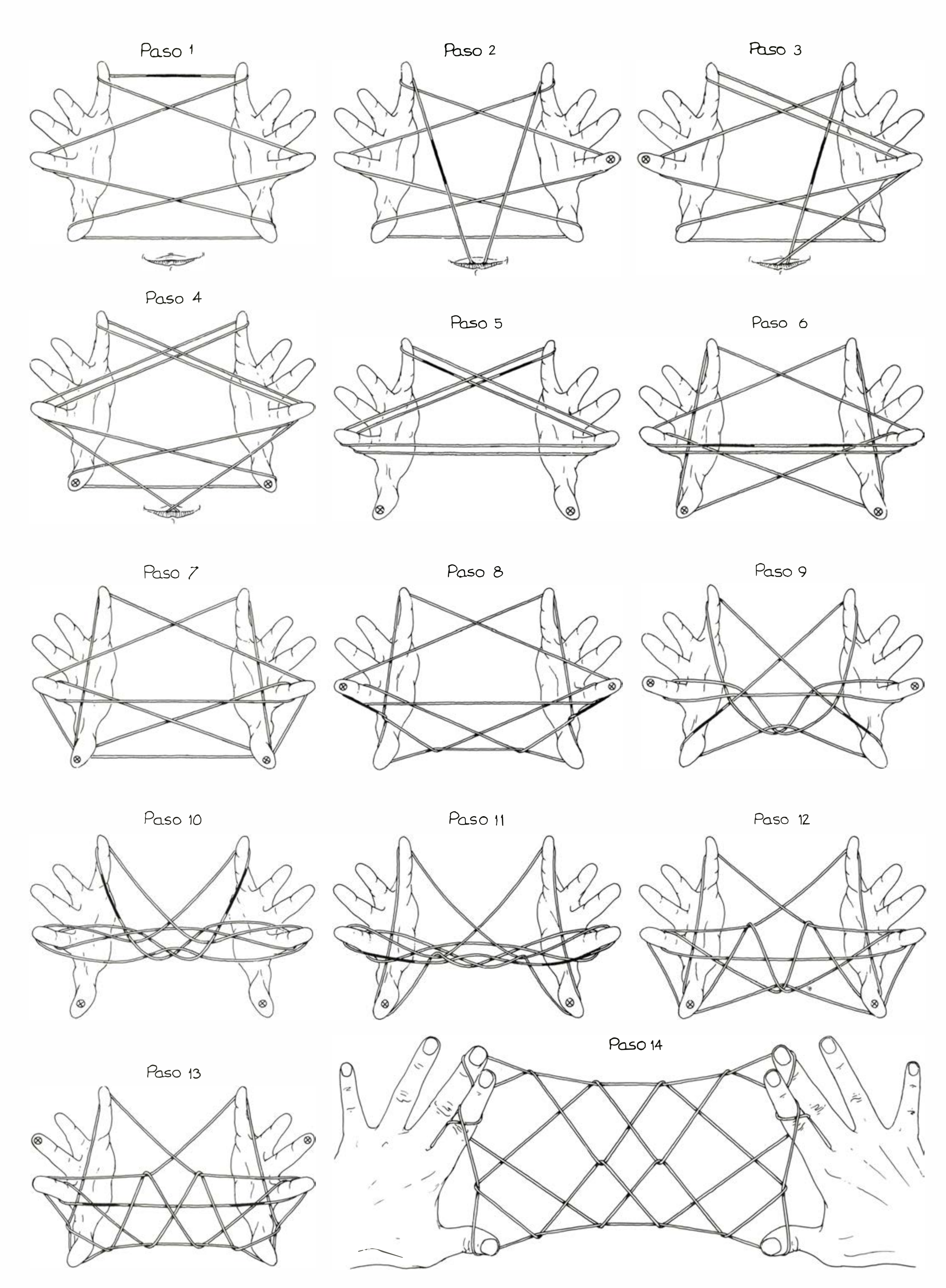
Muchos otros lectores han presentado ejemplos. Tenemos entre ellos un medidor del hematocrito, para valorar las fracciones de materia sólida de la sangre humana, inventado por el Dr. Alan Kwasman, de Loma Linda, California. Mathias Soop, de la Agencia Espacial Europea en Darmstadt, Alemania, presentó un artilugio compuesto por cordel, clavos y clips sujetapapeles. El artilugio ilustra una solución al problema de hacer mínimo el consumo de combustible de los cohetes de maniobra en las operaciones de control de posición de los satélites.



6. El cañón de Park, escupiendo patines a derecha e izquierda

Los lectores rememoraron también artilugios analógicos de más amplia utilidad: el transporte de brazo triple, utilizado para navegación de cabotaje; el estimador de alcances empleado por las fuerzas navales estadounidenses en la segunda guerra mundial, y el planímetro, un instrumento de sencillez maravillosa, que sirva para medir la superficie de una figura plana.

Entre los artilugios analógicos, los mayores y perfectos son las computadoras analógicas. Siguen vivas, y con buena salud, en Electronic Associates, Inc., fabricantes de equipos analógicos de West Long Branch, Nueva Jersey. Me han invitado a visitar su fábrica para ser testigo de la superioridad de estas máquinas sobre los humildes artefactos aquí presentados el pasado mes de agosto.



1. Procedimiento de Phylis Morrison para montar "los diez hombrecillos"

Taller y laboratorio

El juego de la cuna y las topologías que pueden formarse con un bucle de dos metros de cuerda

Jearl Walker

El popular pasatiempo generalmente conocido como juego de la cuna, y también de la madejita, consiste en manipular un bucle de cuerda alrededor de los dedos y así crear una estructura. Tal ejercicio invita a indagar en torno a las reglas aritméticas que surgen de la topología de los anillos simples.

Se comienza enrollando el bucle (una cuerda flexible de unos dos metros de largo) alrededor de dos o tres dedos. Luego, el ejecutante utiliza las manos, los dedos e incluso los dientes, para transformar la trama de cuerda en la figura prefijada, muchas veces a la par que enhebra una historia relativa a la misma. En las versiones más corrientes un segundo ejecutante recoge la estructura con sus dedos para formar otra nueva.

El juego de la cuna lo llevan practicando los niños de todo el mundo desde hace milenios. Dos deliciosos libros me han sugerido la posibilidad de examinar el pasatiempo y algunas de sus variantes. Uno de ellos es *Spiders'Game: A Book for Beginning Weavers* (University of Washington Press, 1979), de Philys Morrison. Nos describe, entre otras cosas, la figura llamada de "los diez hombrecillos", empleándola como ejemplo del modo en que nuestros dedos pueden actuar como un telar [*véase la figura 1*]. El otro libro es *Orderly Tangles: Cloverleafs, Gordian Knots, and Regular Polylinks*, de Alan Holden.

En un sentido topológico estricto, la cuerda que se usa en estos pasatiempos es un anillo, ya que la figura se deshace en un bucle o lazo cerrado cuando se retiran los dedos. No obstante, según la significación vulgar de nudo, las figuras son nudos. Me pregunté si podrían catalogarse los procedimientos para hacer esos nudos. Sin duda las figuras las idearon personas que habían construido mentalmente su propio catálogo de procedimientos. Este mes comenzaremos un catálogo estudiando varias figuras para un solo ejecutante.

Todo análisis precisa de una terminología. Llamaremos tramo a la porción de cuerda comprendida entre dos dedos, y vuelta a la porción que rodea un dedo o una mano completa. En todas las figuras hay puntos en que dos tramos se cruzan: los llamaremos cruces. En las figuras más curiosas hay tramos que se cruzan dos veces: los llamaremos enlaces. (Los fabricantes de tela metálica a estas uniones las llaman enlaces por torsión simple.)

Para examinar los enlaces en una figura recorramos mentalmente toda la longitud de la cuerda a partir de un punto arbitrario. Entonces, cuando atravesemos un enlace, observemos la secuencia de los cruces. Si el tramo en que nos hallamos (el primer tramo) pasa primero por encima y luego por debajo del segundo tramo, esta relación la calificaremos de enlace sobre-soto [*véase la figura 2*]. Pero si el primer tramo pasa primero por debajo y luego por encima del segundo, la relación será un enlace soto-sobre.

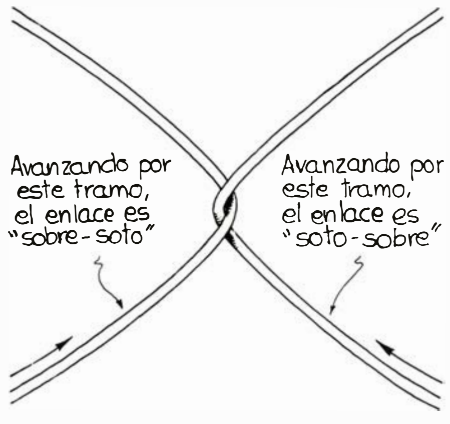
Comencemos con algunas preguntas. ¿Cómo se crean los enlaces? ¿Hay reglas que los rijan? Por ejemplo, ¿debe una figura tener, como es el caso de muchas, un número par de enlaces? ¿Debe tener el mismo número de enlaces sobre-soto y soto-sobre o bien puede influirse de algún modo en los entrelazamientos para que sean de un tipo? Volveremos a estas preguntas tras explicar cómo iniciar el juego y como formar "los diez hombrecillos".

Según W. W. Rouse Ball, cuyo libro se reseña en la sección de Bibliografía de este mes, la mayoría de las figuras se inician con una de tres aperturas básicas: *A*, *B* y Navajo. En la apertura *A* se sostienen ambas manos con las palmas enfrentadas, tal como se muestra en la figura *3* (en las figuras se ha seguido la práctica de sombrear los tramos a reubicar y señalar con *X* los dedos que han de moverse). La cuerda se coloca entonces pasándola por el dorso del meñique, para que cruce la palma y pase por el dorso del pulgar; desde ahí se pasa a la otra mano, por el dorso del pulgar de ésta, cruza la palma hasta el dorso del meñique de la misma, al que rodea para ir a parar al punto inicial en la primera mano. Luego se introduce el índice derecho por debajo del tramo situado en la palma izquierda, se levanta el dedo y se deja enganchado el tramo en el dorso del índice derecho. A continuación se separan las manos para tensar la cuerda.

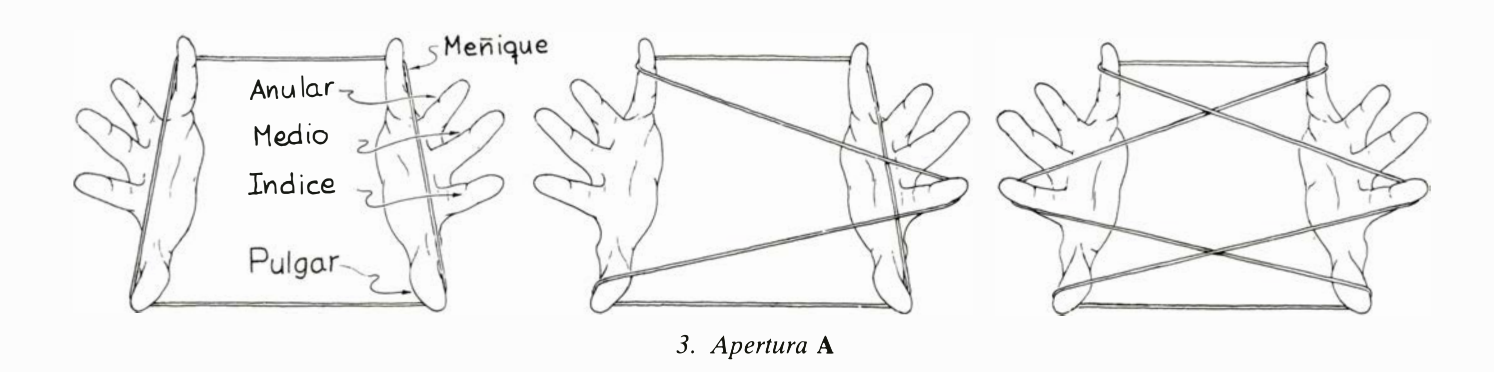
Con el índice izquierdo se recoge el tramo de la palma derecha para engancharlo en el dorso de dicho dedo. Vuelven a separarse las manos. Ya tenemos la apertura *A*. La apertura *B* es idéntica, pero comenzando con el índice izquierdo.

En la apertura Navajo (así llamada por los indios Navajo, que eran muy hábiles con estos juegos) las maniobras son más complicadas. Se empieza con la cuerda haciendo un ocho [*véase la figura 4*], en cuyo rizo superior se insertan los índices y en el rizo inferior los pulgares. (Obsérvese que, en el cruce, el tramo de encima va desde nuestra izquierda hasta nuestra derecha.) Luego apartamos las manos de nosotros con las palmas hacia arriba. Así, el rizo superior del ocho queda atrapado por los dedos índices y el inferior por los pulgares. Por último se giran las manos para dejar las palmas encaradas.

Y ahora "los diez hombrecillos". Se empieza con la apertura *A* y se prosigue a través de 14 pasos. (1) Con los dientes se ase el tramo más lejano y se pasa por encima de los demás tramos. (2) El índice derecho se lleva bajo el tramo que va desde el meñique izquierdo hasta la boca y se levanta para recoger el tramo. Este debe mantenerse cerca de la punta del índice derecho para separarlo de la cuerda que ya estaba rodeando el dedo. (3) Análogamente, se recoge el tramo que va desde el meñique derecho hasta la boca. Como antes, ese tramo debe mantenerse junto a la punta del índice.



2. Cómo identificar un enlace

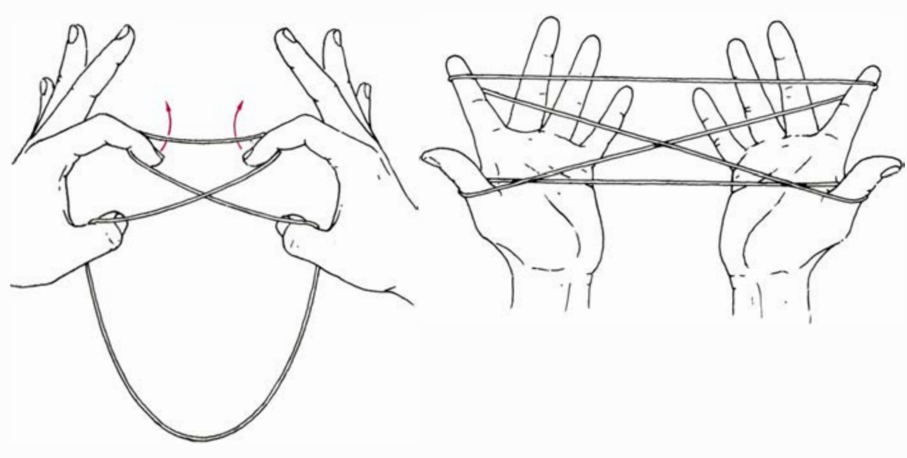


3. Apertura **A**

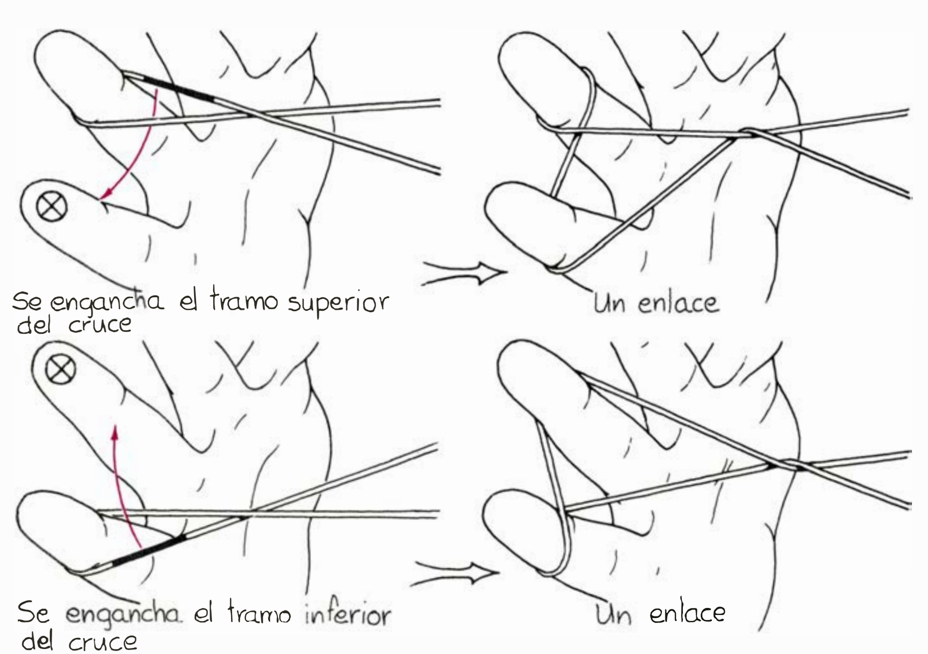
(4) Se suelta la cuerda de la boca y los pulgares, a la vez que se separan las manos para compensar el huelgo. (5) Se doblan ambos pulgares de modo que pasen por debajo de cuatro tramos y recojan el quinto por debajo (éste es el tramo más cercano a nosotros de la vuelta en torno al meñique). Los pulgares, con los tramos que han apresado, se devuelven a sus posiciones originales. (6) Se doblan ambos pulgares para recoger, por debajo, el tramo más cercano a nosotros de la cuerda que rodea la punta del índice. Estos tramos deben mantenerse en la parte alta de cada pulgar para separar esta cuerda de la que ya estaba dando la vuelta a estos dedos.

(7) Con los dientes se levanta la vuelta inferior que hay en cada pulgar, pasándola por encima de la punta de ese dedo para soltarla luego delante del mismo. Este es el llamado movimiento Navajo. (8) Se sueltan las vueltas superiores de cada índice a la vez que se separan las manos lo suficiente para compensar el huelgo. (9) Las vueltas de cada pulgar se trasladan a la parte superior del índice contiguo, para lo cual cada índice se dobla hacia nosotros y la vuelta del pulgar se recoge por debajo. Los tramos así apresados deben mantenerse en la parte superior de cada índice. (10) Ahora se dobla cada pulgar para llevarlo, por debajo de los tramos de cada índice, hasta debajo del tramo más cercano que sale de cada meñique. Con el dorso de cada pulgar se recogen estos tramos y los pulgares se retornan a sus posiciones originales. Estas vueltas deben mantenerse bien bajas en los pulgares. (11) Vuelven a doblarse los pulgares para recoger por debajo cada uno de los tramos más cercanos que salen de las vueltas en torno a las puntas de los índices. Estos tramos deben mantenerse en las partes superiores de los pulgares. (12) En las vueltas de los pulgares se hace el movimiento Navajo. (13) Los dos dedos medios se doblan hacia nosotros, pasándolos por encima de dos tramos. El tercero se recoge por debajo. Los dos tramos así apresados deben mantenerse en la parte superior de cada dedo medio cuando éstos retornen a sus posiciones originales. (14) Para desplegar la figura se sueltan las vueltas en torno a los meñiques, se extienden los pulgares, se juntan los dedos medios e índices, se separan las manos y se giran éstas de modo que los reversos queden hacia nosotros.

En "los diez hombrecillos" hay varios cruces y doce enlaces. Si bien la construcción pude dominarla aproximadamente en una hora, gasté muchas más en hacerme con el modo en que se crean los enlaces. En un método que parece común a varias figuras de madejita, lo que hago es añadir un segundo cruce a dos tramos que ya se cruzan.



4. Apertura Navajo



5. Ganchos con un dedo

Tal como se ilustra en la situación de la figura *5*, ante un dedo con una vuelta de cuerda hay un cruce. Entonces, para crear un enlace, se dobla otro dedo por debajo de los dos tramos y se recoge, por debajo, el tramo superior del cruce. Cuando este dedo regresa a su posición inicial arrastra consigo el tramo apresado por debajo del tramo inferior del cruce y, así, forma un enlace.

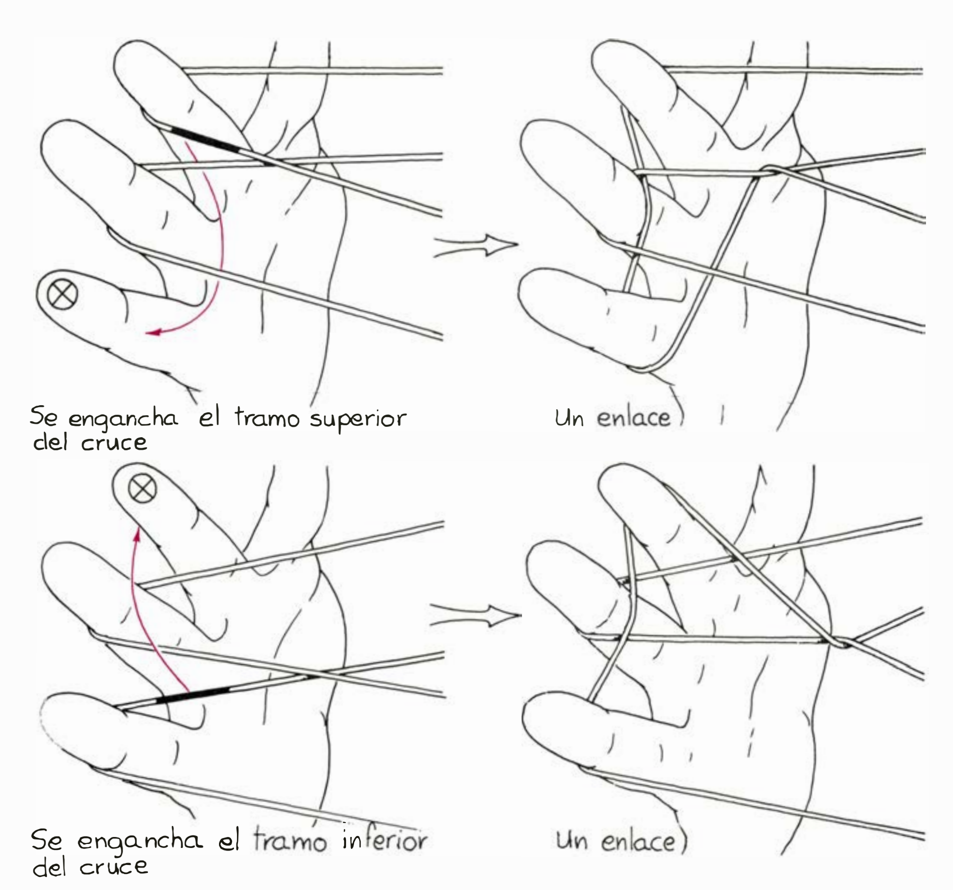
También es posible formar un enlace doblando un dedo por encima del tramo superior y recogiendo el inferior por debajo. Entonces, cuando el dedo regresa a su posición inicial arrastra consigo el tramo inferior por encima del superior, formando así un enlace. Al conjunto de estos movimientos yo lo llamo un gancho, puesto que hay un dedo que engancha un tramo para pasarlo en torno al otro. A veces, los tramos que forman el cruce inicial rodean, o sea, dan la vuelta, a un mismo dedo. Otras veces, los tramos pertenecen a vueltas en torno a dedos distintos. En ambos casos, para formar el enlace, el gancho añade un segundo cruce a los tramos.

Hay figuras en que algún enlace se genera volteando un dedo. Por ejemplo, dispóngase un tramo de un lado a otro de la palma izquierda. Con el índice derecho recójase por debajo la cuerda. A la vez que se separan las manos, gírese el dedo de modo que la cuerda apresada forme un enlace al retorcerse en torno a sí misma. Cuando el dedo realiza la primera mitad de la rotación, forma un cruce en la cuerda que lo rodea. Con la segunda mitad de la rotación se obliga al tramo inferior a pasar por encima del superior, con lo que se crea el enlace.

He descubierto otro procedimiento que, esencialmente, es un gancho [*véase la figura 8*]. La cuerda da una vuelta al índice. De esta vuelta, el tramo cercano cruza bajo un tramo que da una vuelta al pulgar. Cuando se amplía la vuelta en torno al índice, de modo que abarque también al pulgar, se crea un enlace.

En la figura *9* se muestra un gancho doble. Aquí hay dos tramos que se cruzan inicialmente. Un tercer tramo se lleva primero por debajo y luego por encima de un tramo a cada lado del cruce. Así se crean dos enlaces.

El número de enlaces que pueden originarse con movimientos Navajo en las vueltas en torno a un dedo, depende del tamaño y la orientación de éstas. En la parte superior de la figura *10* la vuelta que ocupa la posición más baja forma un ángulo más cerrado que la



6. Ganchos con dos dedos

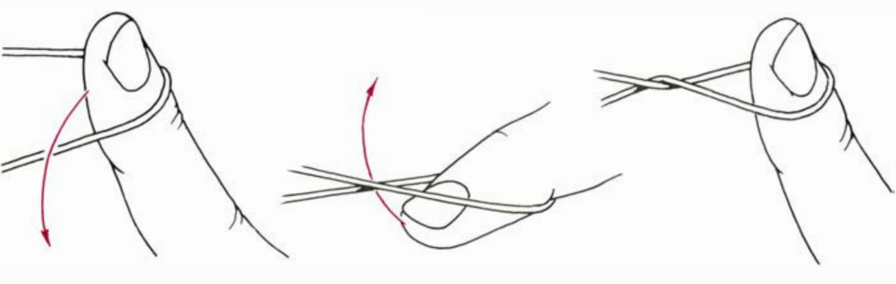
más alta. Como ambas vueltas tienen la misma orientación (sus ángulos en el recodo se abren en la misma dirección), cada porción de la vuelta más baja cruza por debajo la porción correspondiente de la vuelta superior. Entonces, si izamos la vuelta de abajo por encima de la punta del dedo y la soltamos, habremos creado dos enlaces.

En la parte central de la misma figura, la vuelta de arriba forma un ángulo más cerrado que la de abajo. Como ambas vueltas tienen la misma orientación, los lados de la vuelta de abajo no se cruzan con los correspondientes de la de arriba y no hay posibilidad de que un movimiento del tipo Navajo cree ningún enlace.

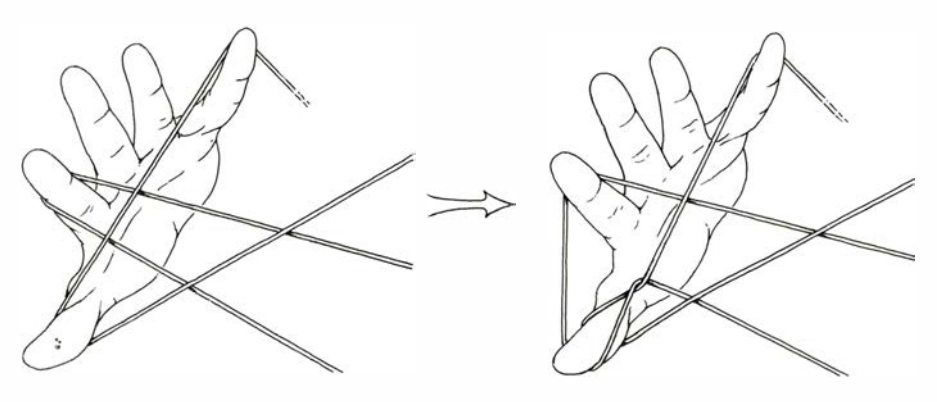
Por último, en la parte inferior de la figura, sólo el lado izquierdo de la vuelta inferior se cruza con el lado izquierdo de la vuelta superior. Así, cuando se efectúa el movimiento Navajo con la vuelta inferior, en el lado izquierdo de la vuelta de arriba aparece un enlace. En resumen, el número de enlaces que se crea con movimientos Navajo sobre un dedo es igual al número de veces que los lados de la vuelta inferior cruzan bajo los correspondientes de la superior antes de realizar los movimientos pertinentes.

A veces, al construir una figura, se produce lo que llamo un enlace potencial. En la figura *11* se muestra un ejemplo. Si el meñique de la derecha suelta la cuerda y se separan las manos para compensar el huelgo, la cuerda desprendida se enlazará en el tramo tendido entre los índices. Al tramar "los diez hombrecillos" se crean bastantes enlaces potenciales como éste, pero de ellos sólo dos llegan a convertirse en enlaces reales.

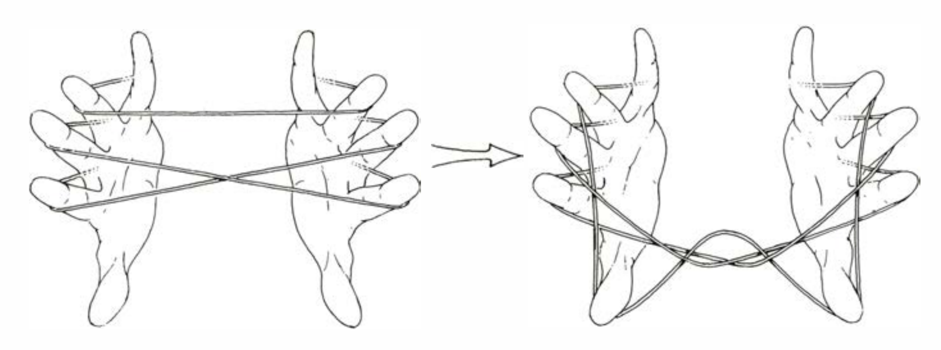
Invirtiendo el procedimiento que crea un enlace, se deshace. Hay casos



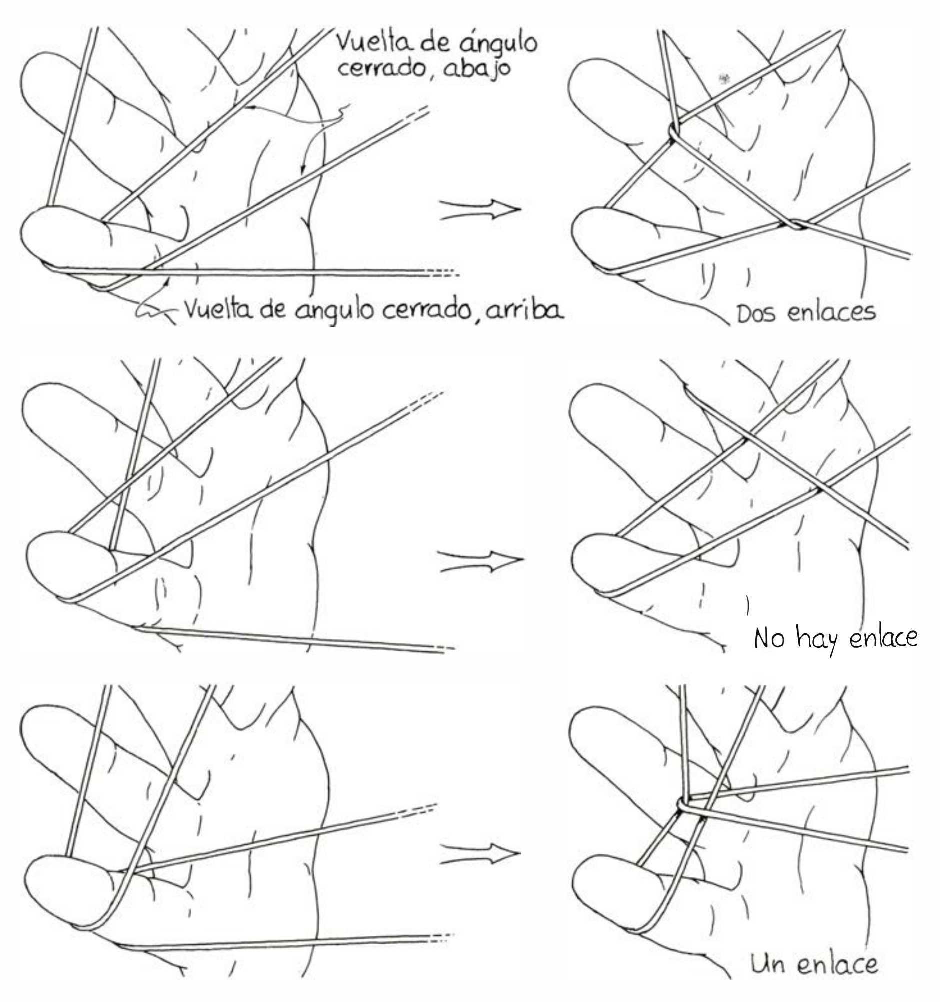
7. Enlace volteando un dedo



8. Ampliación de una vuelta en torno a un pulgar



9. Gancho doble



10. Movimientos Navajo

en que un enlace puede también eliminarse soltando la cuerda de un dedo contiguo al dedo en que se hicieron los movimientos Navajo. Por ejemplo, supongamos que acabamos de hacer movimientos Navajo con las vueltas en torno a un pulgar y que una de esas vueltas abraza también al índice. Entonces, el enlace entre el pulgar y el índice dependerá de la vuelta en torno a éste último, con lo que si aquélla se suelta, desaparecerá el enlace.

Así pues, son tres los métodos básicos para producir enlaces al tejer una figura: el gancho, el movimiento Navajo y el soltar una vuelta para convertir un enlace potencial en uno real. En el gancho se incluyen el volteo de un dedo y la ampliación de una vuelta para que abarque dos dedos. Los enlaces pueden suprimirse invirtiendo un procedimiento o bien desprendiendo una vuelta que estabilice un enlace creado con un movimiento Navajo sobre otro dedo.

Provisto de estos tres pasos básicos, conseguí disecar la formación de "los diez hombrecillos". En la posición de apertura la cuerda presenta sólo cruces. En el paso 1 se crea un enlace potencial. (Si se soltara la cuerda del meñique derecho, aparecería uno real.) En el paso 2 se crea otro enlace potencial. Los enlaces reales no aparecen hasta el paso 7, en que al hacer el movimiento Navajo en las vueltas de los pulgares se crea un total de cuatro. En el paso 8 se eliminan los enlaces que había entre los pulgares y los índices, ya que éstos dependían de las vueltas desprendidas, en este paso, de los índices. Así quedan dos enlaces reales. En el paso 10 los pulgares enganchan tramos para crear dos nuevos enlaces, regresándose al total de cuatro enlaces reales. En el paso 12 se crean otros cuatro enlaces con movimientos Navajo en los pulgares. Otros dos enlaces aparecen en el paso 13, cuando los dedos medios enganchan tramos. (Este gancho es sutil. El cruce inicial lo forman el tramo apresado y un tramo que sale del costado lejano superior del índice.) Finalmente, los dos últimos enlaces se generan cuando los meñiques se desprenden de sus vueltas y convierten dos enlaces potenciales en reales, con lo que el total alcanza los doce.

¿Pueden concebirse reglas generales respecto a los enlaces? Mi parecer es que sí. Por ejemplo, si cada manipulación de la cuerda se hace con ambas manos, el número de enlaces en una figura debe ser cero o par. De esta manera, la de "los diez hombrecillos" es simétrica, pues todo movimiento con la

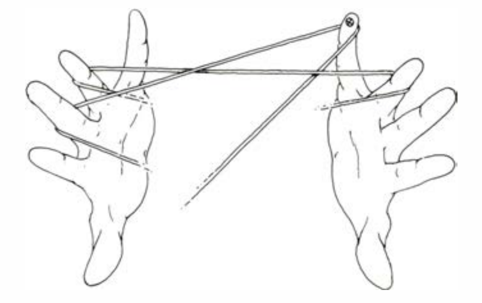
mano derecha se hace asimismo con la izquierda.

En las figuras resultantes de movimientos simétricos, otra regla parece gobernar los tipos de enlace. En “los diez hombrecillos” sigamos la cuerda, desde un punto de partida arbitrario, y observemos los tipos de enlaces por los que pasamos. Por ejemplo, partamos del pulgar izquierdo y comencemos moviéndonos hacia el índice izquierdo. Conforme recorramos mentalmente toda la cuerda, hasta regresar al pulgar izquierdo, pasaremos por doce enlaces sobre-soto y doce enlaces soto-sobre. Diríase que una figura construida a base de movimientos simétricos tendrá siempre el mismo número de enlaces sobre-soto que soto-sobre.

Recorramos otra vez “los diez hombrecillos”, poniendo flechas a lo largo del trayecto que indiquen el sentido en que entramos en cada enlace. Como durante todo el itinerario cada enlace se atraviesa dos veces (una por cada tramo), en cada enlace pondremos dos flechas. Estas apuntarán hacia el enlace desde el mismo lado de éste o desde lados opuestos. En “los diez hombrecillos”, diez de los enlaces tendrán un par de flechas apuntadas desde el mismo lado. Y sólo los dos enlaces centrales apuntarán sus flechas desde lados opuestos. Mi opinión es que todas las figuras construidas con movimientos simétricos resultarán con un número par o nulo de enlaces con flechas apuntadas desde el mismo lado y con un número par o nulo de enlaces con flechas apuntadas desde lados opuestos.

He estado también investigando la formación de enlaces en la “red de pesca”. Este montaje se inicia con la apertura *A*. Luego se sueltan las vueltas de los pulgares. Doblando los pulgares se pasan éstos por debajo de tres tramos para recoger, por debajo, cada tramo más lejano (que da la vuelta a cada meñique). Esa cuerda se lleva a posición retornando los pulgares a la suya inicial. Así tendremos un enlace potencial formado por la cuerda que rodea al meñique izquierdo.

Ahora se dobla cada pulgar, por encima de un tramo. El tramo siguiente se recoge por debajo y se devuelven los pulgares a su posición anterior. Con este movimiento añadimos un enlace potencial asociado al meñique derecho. Soltando la cuerda de cada meñique convertiremos estos enlaces potenciales en reales. Seguidamente se doblan los meñiques, hacia nosotros, por encima de un tramo. Cada tramo siguiente se recoge por debajo y se devuelven los meñiques a su posición inicial. Con este



11. Enlace potencial

movimiento cada meñique realiza un gancho que añade otro enlace real. Ya tenemos cuatro enlaces reales.

La cuerda que rodea los pulgares se suelta ahora. Doblando los pulgares, se pasan éstos por encima de dos tramos, para recoger, por debajo, cada tramo siguiente; éste es el lado cercano de la vuelta en torno al meñique. Los pulgares se devuelven a sus posiciones iniciales. Con la mano derecha se recoge la vuelta en torno al índice izquierdo. Esta vuelta no hay que suprimirla, sino agrandarla para que abarque a ese dedo y también al pulgar. Esencialmente, este movimiento es un gancho porque el tramo que se traslada al pulgar se ve obligado a enlazarse por encima de otro tramo que sale del mismo pulgar. A continuación se hace el mismo movimiento sobre la mano derecha. Así habremos añadido dos enlaces reales y tendremos un total de seis.

En cada pulgar se hace el movimiento Navajo. Como las vueltas no tienen la misma orientación, tal movimiento añade sólo un enlace en cada mano; el total se eleva así a ocho. Cada pulgar tendrá delante, entonces, un pequeño triángulo formado por el tramo procedente del meñique de esa mano. Entonces se doblan los índices hacia nosotros para pasar sus puntas a través del triángulo de la misma mano.

Para desplegar la figura se giran las manos colocando las palmas en el lado opuesto a nosotros y los dedos hacia arriba. En el índice adecuado se prende la cuerda del triángulo en el que está inserto. (La vuelta ya en el dedo se desprenderá.) Se liberan las vueltas en torno a los meñiques. Al prender una cuerda con cada índice, se añade un enlace a cada maniobra y, al soltar la cuerda de los meñiques, se convierten dos enlaces potenciales en dos reales. Ya hemos llegado a doce enlaces reales. En efecto, entre cada pulgar e índice hay un enlace y, además, un cruce; a través de la figura se reparten diez enlaces más.



12. "Red de pesca" desplegada

La "red de pesca" cumple mis reglas improvisadas. El número total de enlaces es par a causa de la simetría de los movimientos en una y otra mano. Al recorrer la cuerda desde un punto de partida arbitrario, se encuentra que el número de enlaces sobre-soto es igual al de enlaces soto-sobre. Al poner flechas para señalar de qué modo se entra en cada enlace, se encuentra que diez de ellas apuntan desde lados opuestos y otras dos (los enlaces centrales de la figura) lo hacen desde el mismo lado. (Resultado inverso al encontrado en "los diez hombrecillos".)

¿Se mantienen las reglas aritméticas para otras figuras? Dejo al lector la tarea de aplicarlas al "relámpago", figura en zig-zag inventada por los navajos. Se empieza (ni que decir tiene) con la apertura Navajo. Luego se prosigue doblando cada pulgar, pasándolos por encima de dos tramos; con el dorso de cada dedo se recoge, por debajo, el tramo siguiente. Se tira entonces de la cuerda retornando los pulgares a su posición original.

A continuación se doblan, hacia nosotros, los dedos medios de modo que pasen por encima de un tramo. Con el dorso de cada dedo se recoge, por debajo, el tramo siguiente. Se tira entonces de la cuerda retornando los dedos medios a su posición original. Después se dobla, hacia nosotros, cada anular, pasándolo por encima de un tramo. Con el dorso de cada dedo se recoge, por debajo, el tramo siguiente. De éste se tira devolviendo los dedos anulares a su posición original.

Ahora se dobla cada meñique hacia nosotros, pasándolo por encima de un tramo, y con el dorso del dedo se recoge, por debajo, el tramo siguiente. Se tira de la cuerda devolviendo los meñiques a su posición original. Seguidamente se doblan los pulgares para que sus puntas toquen el tramo delantero de la cuerda que rodea a cada meñique. Así se soltarán los tramos arrollados en torno a los pulgares. Con un movimiento rápido de las muñecas se lanzan estos tramos por encima de los otros. Las puntas de los pulgares se aprietan fuerte contra los tramos de cuerda que tocan. Para desplegar la figura se giran las palmas con el dorso hacia nosotros, a la vez que se extienden los dedos.

Si alguien descubre más procedimientos para urdir figuras a base de enlaces, recibiré gustoso sus noticias. ¿Son correctas mis reglas acerca del número y naturaleza de los enlaces? ¿Es alguien capaz de idear una demostración general de tales reglas, o de encontrar más?



13. "Relámpago" completo

Libros

Acústica musical, historia del cálculo, genética básica y oscilación no lineal

Luis Bru, J. F. Prida, C. López-Fanjal y Jaime Muñoz

Los Sonidos de la Música, por John R. Pierce. Prensa Científica, S.A.; Barcelona, 1985. Siguiendo en su empeño de dar a conocer al público de habla castellana cuestiones de indudable interés para los lectores asiduos a la revista *Investigación y Ciencia* y a aquellos otros que, sin serlo, sienten curiosidad por penetrar en el mundo de la ciencia actual, Prensa Científica nos acaba de obsequiar con la traducción del libro *Los sonidos de la música*, del que es autor John R. Pierce, que durante muchos años ha trabajado en la División de los Laboratorios Bell encargada de la investigación en el campo de la voz y de la audición. En el prólogo del libro explica cómo pronto le cautivó la ciencia del sonido. Sólo por leer con detenimiento ese magnífico prólogo, vale la pena realizar el esfuerzo, si es que puede llamársele así, de continuar hasta el final, pues el libro, en el amplio abanico de temas que contempla, no tiene desperdicio. Espléndidamente ilustrado, ofrece una visión fascinante de las fronteras de la música contemporánea y analiza el trabajo de muchos compositores actuales. Es, quizás, el primer libro de acústica para lectores no especializados, escrito bajo el punto de vista de la música electrónica y de la generada por ordenadores.

En él se describen los aspectos físicos y matemáticos de las ondas sonoras que son la base de nuestra experiencia musical. Se ocupa, en particular, de la *psicoacústica* del sonido musical, rama ésta de la psicología experimental que relaciona los sonidos físicos con sus características percibidas. Quienes se dedican a ella estudian la intensidad de los sonidos apenas audibles, las mínimas diferencias en intensidad sonora, la sonoridad y otros muchos aspectos complejos de la percepción auditiva.

La contribución de Hermann von Helmholtz, que escribió en 1863 "El estudio de las sensaciones del tono como base psicológica para la teoría de la música", a la psicoacústica, y las de Wallace Clement Sabine, que creó la ciencia de la arquitectura acústica a principios de siglo, son entre otras muchas cuestiones, que iremos indicando, muy bien descritas en este libro que estamos glosando.

El oído es un órgano maravilloso que nos permite experimentar la sensación sonora, sea cualquiera la causa que la motive, dotado de la capacidad de distinguir, aparte de su intensidad, las dos características más acusadas de un sonido, "el tono" o frecuencia y "el timbre" o la calidad. Un oído joven normal es sensible para los sonidos cuyas frecuencias están comprendidas entre algunos hertz y 20.000 Hz. El detectar el timbre con precisión es una cualidad muy personal que se adquiere o mejora mediante una educación apropiada. El que la posee, puede seleccionar un determinado instrumento de una orquesta y "seguirlo" a lo largo de la audición. En este aspecto, el oído es un órgano mucho más perfecto que el ojo, que no es capaz de distinguir si un determinado color es puro o el resultado de una mezcla de varios.

Los griegos se dieron pronto cuenta de la estrecha relación que existe entre la música y las matemáticas. Las leyes de las cuerdas vibrantes fueron enunciadas por Pitágoras en el siglo VI a. C. Descubrió que las principales consonancias octava, cuarta y quinta correspondían a las divisiones exactas de una cuerda tensa. Su gama contiene, además de esas consonancias, las disonancias tercera y sexta. La escala griega por excelencia es la llamada doriana, que corresponde a nuestro mi bemol. También las viejas civilizaciones chinas, caldeas, babilónicas y egipcias habían dedicado gran atención a estos hechos.

Lo más destacable de la contribución de Pitágoras es la posibilidad de expresar mediante relaciones numéricas sencillas las vibraciones que las cuerdas son capaces de producir. El compositor Igor Stravinsky dijo en cierta ocasión: "Una forma musical está más cerca de las matemáticas que la literatura, no quizá de la propia matemática, pero sí del pensamiento matemático". Utiliza de manera consciente "el pensamiento matemático" como elemento integrante de la música.

Las ideas de Pitágoras calaron muy hondo en la humanidad, llenando la Edad Media y resucitando con brío y pasión durante el Renacimiento. Célebre es a este respecto la polémica que mantuvieron Vicenzo Galilei, padre del famoso Galileo, y Giosaffo Zerlino. Durante el período barroco, tanto en óperas, como *Orfeo y Ariana* del cremonés Monteverdi, como en las sonatas del boloñés Corelli o del veneciano Vivaldi o en las fugas del teutón Bach, se sigue manteniendo un respetuoso culto por los números como base de la música.

La astronomía tampoco se quedó a un lado. El trabajo de Kepler, *De Harmonices Mundi*, publicado en 1619, representa uno de los hechos más sorprendentes de la historia de las ideas. Lo que más destaca es la absoluta convicción de Kepler de que las varias partes del universo están dispuestas de acuerdo con las nociones abstractas de la belleza y de la armonía. Las ideas se extienden tanto que, en un grabado del siglo XVII, se representan las manos de Dios pulsando "el monocordio del mundo". Los elementos básicos, agua, tierra, aire y fuego se reparten siguiendo una relación armónica.

También la arquitectura fue fiel a estos razonamientos. Un edificio resulta armonioso cuando sus proporciones guardan entre sí las relaciones preconizadas por los "números musicales". La cuestión se trata con gran detalle en el libro de R. Wittkower, *Architectural Principles in the Age of Humanism*. La Iglesia de Santa María Novella, en Florencia, obra del arquitecto Alberti, está enmarcada en cuadros que guardan entre sí la relación 1:2, de una octava. Las dimensiones de la puerta principal lo están en la relación 2:3. Muchas de estas cuestiones que acabamos de apostrofar y otras, que el espacio de que disponemos no nos permite incluir, están magníficamente expuestas en el libro de Pierce, cuya lectura, una vez más, recomendamos a los que aman y sienten la música.

Como se menciona en el prefacio, se debe a Sabine la creación de la ciencia de la arquitectura acústica que tan importante lugar ocupa en el momento actual. La elección de los materiales empleados en salas de conciertos y estudios de grabación y los evidentes progresos en la concepción de modelos a

escala, aparte del desarrollo imparable de la electrónica, ha conducido a que los modernos auditorios sean verdaderos centros dotados de una acústica perfecta, lo que se ha conseguido investigando "in situ" una vez concluidos, mediante la colaboración de físicos, arquitectos y profesionales de la música. Así ha ocurrido con el Royal Festival de Londres o con el viejo Metropolitan de Nueva York. En ambos casos se llevaron a cabo correcciones que eran muy necesarias. Entre nosotros, el Teatro Real de Madrid ha estado a punto de desaparecer. Por razones que pueden considerarse fortuitas, resultó dotado de unas condiciones acústicas magníficas. Tanto era así, que querían conservarse a todo trance. Se trataba de apuntalar un espacio vacío, que sólo contenía acústica, que precisaba de urgentes obras para mantenerlo a fin de no perder esas condiciones, que con cierta sencillez pueden lograrse y mejorarse en el momento actual.

Una consideración que echamos de menos en el libro es la siguiente: ¿Por qué amamos la música? Como sabemos, la música es sólo una secuencia de ondas sonoras. ¿Por qué la música de Wolfgang Amadeus Mozart repercutió en la forma que lo hizo en su rival Antonio Salieri? ¿Por qué llenamos nuestra propia vida con música tanto en las salas de conciertos, en las calles, en los grandes estadios deportivos o en las explosivas manifestaciones brasileñas? ¿Cómo es posible que una secuencia de ondas sonoras se apodere de nuestro interior?

Parte de la respuesta radica en la misma física de las ondas sonoras y así lo hemos indicado al referirnos a las leyes matemáticas que rigen las escalas musicales. Pero ello no acaba de explicar por qué un sonido no pasa de ser algo banal y otro puede ser mágico. Probablemente el poder de la música no estriba en ella, sino en nosotros mismos. Al igual que los ojos son receptores de luz y los oídos de sonidos, algo debe existir en nuestro cerebro que actúa como receptor de música. Gardner, un psicólogo de Harvard, arguye que la inteligencia musical es análoga a otras formas de la inteligencia, como puede ser la matemática. Ha realizado numerosos experimentos que comprueban su manera de pensar. En algunos aspectos asegura que la habilidad para la música y el lenguaje son análogas. En el libro se dedica un capítulo para relacionar la intensidad de un sonido, que se mide en unidades físicas, con la sensación que tal sonido nos produce obedeciendo a la ley fisiológica de Weber-Fescher, que se mide en *decibelios*, cuya escala, por ser logarítmica, es muy reducida. Está comprendida entre cero y 120. Por encima de este número, la sensación que se percibe lo es en forma de dolor y puede llegar a destruir nuestro órgano auditivo. Recalca, lo que es muy útil, pienso, para los profesionales médicos, la importancia de la frecuencia en estas unidades a la hora, por ejemplo, de hacer una audiometría.

El capítulo 14 dedicado a la percepción, ilusión y efecto, es de un gran interés así como el consagrado a la creación de nuevos sonidos que tienen su origen en la magia de la electrónica.

El libro se complementa con exhaustivos apéndices, que quizás interesen sólo a algunos lectores, y unas microbiografías, que contribuyen a acrecentar el nivel cultural de gran parte de esos lectores. Reproduce asimismo grabados y fotografías, amén de gráficos y dibujos que ayudan mucho a la lectura y mejor comprensión del libro, al que acompañan dos discos de 33 r.p.m. que contienen: Ondas sinusoidales, escalas y batidos, consonancia – Armonía, acordes, potencia y reproducción - Síntesis de sonidos - Paradoja e ilusión. Los buenos aficionados a la música, los entendidos y con toda seguridad los críticos musicales encontrarán en esos discos un magnífico complemento del libro que, estoy seguro, los escucharán una y otra vez. (L. B.)

DEL CÁLCULO A LA TEORÍA DE CONJUNTOS, 1630-1910. UNA INTRODUCCIÓN HISTÓRICA, por I. Grattan Guinness, Kirsti Andersen, H. J. M. Bos, Thomas Hawkins, W. Dauben, R. Bunn. Alianza Editorial, S.A.; Madrid, 1984. Bajo la dirección de Grattan Guinness, autor de una breve introducción y responsable de uno de los capítulos, seis especialistas en las distintas etapas de la historia del cálculo abarcadas por el libro exponen de forma magistral la génesis y el desarrollo de las ideas que fueron configurando el análisis diferencial e integral hasta que adquirió su forma actual a finales del siglo XIX. Los autores han seguido el criterio de centrarse en los escritos principales de los matemáticos más eminentes, haciéndose sólo breves referencias a otros de menor relieve.

El libro comienza con un artículo de Andersen, en el que se analizan los métodos de cálculo que preceden a la obra de Newton y Leibniz, cuya raíz hay que buscar en los grandes científicos del siglo XVI, que también fueron grandes matemáticos. En este período Johan Kepler, Simon Stevin y Galileo Galilei rompen con la física aristotélica e inician una nueva época en la que la física hará cada vez mayor uso de los métodos matemáticos, utilizando técnicas infinitesimales que, aunque carecían de la precisión y elegancia de la matemática griega, se mostraron útiles para la obtención de resultados correctos.

A lo largo del siglo XVII se investigaron cuestiones relacionadas con curvas, en un principio ya conocidas por los griegos (cónicas, cuadratiz de Hippias, espiral de Arquímedes, conchoide de Nicodemus, cisoide de Diocles, etcétera) y posteriormente otras nuevas (cicloide, parábolas e hipérbolas de orden superior, etcétera) en ocasiones motivadas por la física, como en el caso de las evolutas y del óvalo de Descartes. La naturaleza de los problemas investigados solía hacer referencia al trazado de tangentes, cálculo de áreas y volúmenes, rectificación de arcos de curvas, así como al cálculo de máximos y mínimos.

Entre las aportaciones al progreso del cálculo correspondientes a este período, Andersen dedica especial atención a las realizadas por Viete y su discípulo Fermat, que desarrolló un procedimiento para calcular máximos y mínimos combinando ideas propias con otras de Viete y hasta de Pappus; al método inventado por Descartes para trazar la normal a una curva; a la regla de Hudde para hallar raíces dobles, que facilitaba la aplicación del método de Descartes; a los procedimientos inventados independientemente por Torricelli y Roberval para el trazado de tangentes haciendo uso de argumentos cinemáticos, método que permitió a Roberval determinar correctamente las tangentes de todas las curvas que se manejaban en la época y, finalmente, a los métodos de integración geométrica y aritmética, respectivamente desarrollados por Cavalieri y Wallis.

En el segundo capítulo, Bos comienza analizando la obra de Newton y Leibniz, inventores de forma independiente de dos tipos distintos de cálculo diferencial e integral, aún lejanos al cálculo tal como se concibe actualmente, pero que ya contenían muchas de sus ideas fundamentales, dejando de ser un conjunto de métodos inconexos.

Para Newton, cuyas ideas maduraron entre 1664 y 1666, aunque no fueron publicadas hasta pasado un cuarto de siglo, las curvas eran concebidas dinámicamente, estando generadas por puntos que se mueven en el tiempo, viniendo su estudio extraordinariamente facilitado al poseer una representación

canónica, en la que la variable independiente se expresa como una suma infinita de potencias de x, multiplicadas por un coeficiente constante. Esta representación posibilita un tratamiento algorítmico –un cálculo– del problema de la cuadratura de curvas analíticas complicadas e incluso trascendentes, denominado por Newton cálculo de fluxiones y de fluentes, apareciendo por primera vez de forma explícita que el problema de hallar la derivada (fluxión) de una cierta curva (fluente) es el inverso del problema de cuadratura o, más exactamente y en la nomenclatura de Newton, del problema de hallar la relación entre las fluentes conocida la relación entre las fluxiones.

Aunque el cálculo de Newton es absolutamente correcto en cuanto a resultados, su fundamentación, basada en la teoría de las razones primeras y últimas, sigue siendo tan insatisfactoria como la de los métodos de sus antecesores, que utilizaban magnitudes infinitesimales, aunque es obvio que la potencia del nuevo cálculo era muy superior a la de aquellos procedimientos.

La influencia del cálculo desarrollado por Newton no fue sin embargo grande, en parte debido a la falta de discípulos brillantes como consecuencia del aislamiento en que quedó la matemática inglesa tras la célebre disputa sobre prioridad entre Newton y Leibniz, que alrededor de 1675 desarrolló de forma totalmente independiente un cálculo basado en ideas semejantes a las de Newton.

La obra de Leibniz, publicada en 1684, antes que la de Newton, ejerció una influencia mucho mayor en la evolución del cálculo, en parte por haber inventado simultáneamente una notación mucho más flexible que la de Newton y en parte por haber sido desarrollada por matemáticos de la talla de Jakob y Johann Bernoulli, el marqués de l'Hôpital y Leonhard Euler.

El interés de Leibniz en desarrollar procedimientos algorítmicos para resolver todo tipo de problemas le llevó a dedicar particular atención a cuestiones de simbolismo y nomenclatura, dando mayor importancia a métodos que a resultados. Y fruto de este interés fue el desarrollo de una notación para el cálculo diferencial, que es esencialmente la utilizada en la actualidad. Por otra parte, la concepción de la integral como una suma lleva a Leibniz a darse cuenta de que el cálculo de cuadraturas debe ser abordado de forma inversa al de tangentes (cálculo de diferencias), obteniendo la misma conclusión que Newton.

Tras relatar la reticencia de Leibniz a publicar su nuevo cálculo a causa de su deficiente fundamentación, una vez más basada en la existencia de infinitésimos, Bos narra la desafortunada solución dada al problema por Leibniz definiendo las diferenciales como magnitudes finitas, así como la forma en que finalmente se divulgan las nuevas ideas tras la publicación del "Analyse" del marqués de l'Hôpital en 1696. En este texto se recogen algunos de los desarrollos del cálculo de Leibniz debidos a Johann Bernoulli, quien, al igual que su hermano Jakob, contribuyó considerablemente al progreso de la nueva disciplina, siendo notable la habilidad de ambos para traducir problemas geométricos y mecánicos en ecuaciones diferenciales.

El enorme avance del cálculo a lo largo de los cincuenta años que siguieron a la publicación de los primeros artículos de Leibniz fue sistematizado magistralmente por la gigantesca figura de Leonhard Euler, que contribuyó al progreso de numerosas ramas de la ciencia y dio un nuevo enfoque al análisis, que tuvo una influencia decisiva durante más de medio siglo. A través de su ingente obra, con diferencia la de mayor amplitud a lo largo de la historia de la matemática, aparecen nuevos desarrollos de métodos analíticos, habiendo impulsado notablemente el cálculo de variaciones, cuyos comienzos aparecen ya en los estudios de los Bernoulli relativos a la braquistócrona.

El problema que quedaba por resolver a lo largo del siglo XVIII era sin duda el relativo a los fundamentos del cálculo, por el que Euler no demostró especial interés. La crítica a los matemáticos del obispo y filósofo George Berkeley, en 1734, tuvo un influjo notable en el impulso de los trabajos de fundamentación realizados a finales del siglo XVIII por Lagrange y posteriormente y de forma mucho más decisiva por Cauchy, cuya mayor aportación fue la de concebir como idea básica del análisis la noción de límite, aun cuando la falta de conocimientos acerca de la recta real propia de la época fuese causa de ciertas imprecisiones. Este gran avance en el campo de la fundamentación coincide con un enorme progreso del cálculo como consecuencia de las numerosas cuestiones que suscitó la aparición de las series de Fourier, motivada por la ecuación diferencial que representa la propagación del calor. Muchos de los problemas que se abordan entre 1780 y 1880, período cubierto en el libro por el capítulo escrito por Guinness, hacen referencia a la convergencia de ciertas series de Taylor, siendo especialmente investigado el problema general de convergencia de las series de Fourier. Por otra parte y merced a Dirichlet, a partir de 1837 se ensancha el estrecho concepto de función de la época anterior, produciéndose un importante avance en el campo de las series de funciones y criterios de convergencia, así como en lo relativo a límites múltiples.

El estudio de las series trigonométricas iniciado por Dirichlet tuvo su continuación en la obra genial de Bernhard Riemann, que contribuyó notablemente al estudio de las series de Fourier, planteando un sinnúmero de cuestiones interesantes, que ocuparon la atención de los matemáticos del último tercio del siglo XIX. En esta época Weierstrass y sus discípulos desempeñan un papel decisivo en la fundamentación del cálculo, afirmando Guinness que la historia del análisis matemático durante ese período es la historia de los matemáticos que se pusieron a aplicar las técnicas de Weierstrass a los problemas propuestos por Riemann.

En el cuarto capítulo del libro, Hawkins relata la historia de la teoría de la integración, noción que surge mucho antes que la de límite y cuando el concepto de función se entendía todavía de forma muy restringida. Tras un período en el que unos matemáticos se inclinan a concebir la integral como la antiderivada y otros como una suma, se plantean cuestiones relativas a integrales de funciones arbitrarias, que aparecían en conexión con la solución de la ecuación diferencial a que da lugar el problema de la cuerda vibrante. Tras analizar las contribuciones a la teoría de la integración realizadas por Fourier, Hawkins estudia la obra de Cauchy y Riemann, que estableció un interesante criterio de integrabilidad, según el cual una función podía ser integrable en un intervalo pese a ser discontinua en una infinidad de puntos del mismo, con tal de que éstos pudiesen ser recubiertos por un conjunto numerable de intervalos de longitud total arbitrariamente pequeña. Riemann dio un ejemplo de una tal función utilizando la técnica de condensación de singularidades, mientras que Weierstrass definió una función continua no diferenciable en ninguna parte.

Lamentablemente, la noción de integral introducida por Riemann no era completamente satisfactoria, lo que en último término cabe atribuir a que la integral del límite de una serie de funciones f_n ($n = 0, 1, \ldots$) no coincide en general con el límite de la integral de f_n. Un nuevo concepto de integral con

esa propiedad no fue posible hasta que surgió una satisfactoria teoría de la medida, a la que contribuyeron notablemente las investigaciones de Jordan, Harnack y Cantor, que culminaron con la obra de Borel, la cual sirvió de base a la definitiva noción de integral introducida por Lebesque en 1902.

Una línea de investigación distinta, que resultó ser absolutamente básica no sólo para la fundamentación del cálculo sino de toda la matemática, fue la iniciada por el alemán Georg Cantor, cuya vida y obra expone Dauben en uno de los más interesantes capítulos del libro. Las enormes dificultades que a lo largo de su vida acompañaron a Cantor como consecuencia del rechazo de su obra por algunos de los matemáticos más célebres de su época, en buena parte debido a la nefasta postura que respecto a la misma adoptó Kronecker, no logró impedir que sus ideas revolucionarias fuesen cobrando cada vez mayor aceptación entre los matemáticos jóvenes, hasta acabar por imponerse. Las investigaciones de Cantor sobre los conjuntos infinitos fueron enormemente fructíferas en todos los órdenes, tanto en lo referente a introducción de nuevas ideas básicas (ordinales, cardinales, alefs, etcétera) como en lo relativo al hallazgo de nuevas técnicas y resultados (método de diagonalización, no numerabilidad de los números reales, etcétera) y planteamiento de nuevos problemas (hipótesis del continuo y otros). Las ideas de Cantor proporcionaron un conocimiento mucho más profundo de la recta real, a cuyo estudio contribuyeron también de forma decisiva las investigaciones de Dedekind, sirviendo como punto de partida a la obra de fundamentación de la matemática emprendida por Gottlob Frege, otra gigantesca figura cuyos méritos no fueron suficientemente reconocidos a lo largo de su oscura vida de Privatdozent en la Universidad de Halle.

A la obra de fundamentación emprendida por Frege se dedica el último capítulo del libro, escrito por Bunn, en el que se relatan los avances realizados en este campo hasta 1910, período en el que la aparición de ciertas paradojas en la teoría de conjuntos, como las de Cantor, Burali-Forti y Russell, estimuló decisivamente la investigación. La introducción de los lenguajes formales por Frege y Peano, la axiomatización de la teoría de conjuntos por Zermelo, la solución de Russell al problema de las paradojas y los trabajos de Hilbert sobre problemas de consistencia, dieron lugar al nacimiento de una nueva ciencia: la metamatemática o teoría de la demostración, que pronto produciría resultados notables (Lowenheim 1915, Skolem 1920), adquiriendo un impresionante desarrollo a partir de 1930. El libro se cierra con un interesante relato de las posturas que adoptaron los matemáticos en relación con el axioma de elección, formulado explícitamente por primera vez en 1904 por Zermelo, pero ya utilizado en época anterior en ciertas demostraciones por Bolzano, Weierstrass y Dedekind. El carácter fuertemente inconstructivo de este axioma, que afirma la existencia de un conjunto del que apenas se conoce nada, motivó el rechazo por parte de algunos matemáticos y en particular por la escuela intuicionista de Brouwer, en la que el cuantificador existencial se interpreta de forma distinta que en la matemática formalista.

Se trata de una obra excelente, cuya lectura exige esfuerzo y ciertos conocimientos de matemáticas, pero que resultará apasionante a cuantos se interesen por la historia de la ciencia. Quizá se eche de menos un capítulo dedicado al análisis no-standard, que daría una visión definitiva sobre la polémica secular en torno a la existencia de magnitudes infinitesimales, pero se comprenden las múltiples razones que ha podido tener Guinness para no incluirlo. Es de destacar también la buena traducción de Mariano Martínez, teniéndose en cambio que lamentar algunas erratas, sobre todo en los índices, que sólo rara vez remiten a la página correcta. (J. F. P.)

GENÉTICA, por John B. Jenkins. Editorial Reverté, S.A.; Barcelona, 1982. Los textos de genética general que prueban suerte en el mercado aumentan cada año en número, grosor e, inevitablemente, en precio. La oferta se diversifica, al menos en apariencia, para satisfacer la creciente demanda determinada por el incremento de la población estudiantil y, al mismo tiempo, la dimensión de las obras se agranda como consecuencia del muy considerable desarrollo experimentado por la materia científica en consideración. Uno se pregunta si esta doble proliferación de manuales y páginas es beneficiosa y la respuesta no es tan clara como cabría desear. Es cierto que la mayor variedad permite una mejor elección, pero esta indudable ventaja ha venido acompañada por una clara tendencia inflacionista y algunos libros parecen haberse escrito con el único propósito de aprovechar la ocasión que brindan unas ventas en expansión, sin ofrecer a los lectores un producto mejor que los anteriores o al menos distinto. Adicionalmente, por voluminoso que sea el tratado (y hoy casi todos lo son), es casi imposible pasar una revista adecuada ni siquiera a las principales facetas de la genética. Por ello, quizá fuese preferible reemplazar el centón tradicional por unas cuantas obras específicas de los aspectos más importantes del tema. Esto equivaldría a reconocer la inevitable especialización de autores y profesores, que no pueden, de hecho, estar al día en campos distintos del suyo propio, y supondría además un reto más directo a su capacidad y cualidades didácticas precisamente en el terreno que pretenden dominar. Comprendo sin embargo que esta opinión tropieza inevitablemente con un alumnado poco propenso a la consulta bibliográfica (inconvenientes económicos aparte) y con la facilidad operativa que un texto único proporciona a enseñantes y estudiantes.

La obra que nos ocupa no pasa de ser una más del aluvión al que acabo de aludir. Puede considerarse dividida en tres partes (clásica, molecular y poblaciones) de extensión semejante las dos primeras (alrededor del 45 por ciento del total cada una de ellas) y más reducida (aproximadamente un 10 por ciento) la última. La exposición, como se avanza en el prefacio, sigue un orden histórico "con el fin de mejorar la comprensión de las ideas fundamentales". Confieso que no soy capaz de decidir si esta estrategia es más o menos ventajosa que su alternativa reduccionista, representada por un camino deductivo de complejidad ascendente que idealmente comienza por las propiedades físicoquímicas del material hereditario y termina con el individuo o quizá con la macroevolución. Prefiero dejar la palabra a mis colegas en la Universidad Complutense que, desde hace algunos años, se han inclinado mayoritariamente por el segundo procedimiento.

La calidad de las tres porciones de la obra es, en general, mediana, sobre todo en lo que respecta a la primera (clásica) y la última (poblaciones). Aprovecharé esta ocasión para señalar la baja ley de los capítulos referentes a genética de poblaciones (cuantitativa o cualitativa) en la mayoría de las obras generales publicadas con propósitos didácticos. Esto se debe, por una parte, a que la metodología del tema, basada en la elaboración de modelos matemático-estadísticos y en su comprobación experimental, es radicalmente diferente de la utilizada en las restantes ramas de la materia. Por otra parte sus propósitos son también distintos, pues la he-

rencia mendeliana tanto en los estudios evolutivos como en el desarrollo de las técnicas de mejora genética no pasa de ser un ingrediente, todo lo indispensable que se quiera, pero ingrediente al fin. Estas circunstancias han venido causando que mientras las secciones clásica y molecular de cualquier libro de texto están normalmente al día, la de poblaciones suele permanecer, en su mayoría, al nivel de los años treinta. La obra que estamos comentando no es excepción en este particular.

El libro de Jenkins no se caracteriza por su claridad de exposición y puede anticiparse que el estudiante primerizo que lo utilice como texto básico encontrará dificultades en la comprensión de muchos conceptos. Tampoco se distingue por la calidad de la información aportada, que es deficiente en repetidos casos. Tomaré como ejemplo la discusión sobre la naturaleza de la herencia del cociente intelectual (CI) que se trata en los capítulos 3 (Expansión de los principios mendelianos) y 16 (Genética: pasado, presente y futuro), siendo uno de los tres temas (junto con el ADN recombinante y la mutagénesis ambiental) que el autor, en una actitud un tanto morbosa, considera más actuales. En primer lugar, la relación entre el CI y la inteligencia ha sido puesta repetidamente en tela de juicio (como Jenkins, inexplicablemente, hace constar). En segundo, la existencia de una influencia hereditaria sobre el CI está lejos de haber sido demostrada y más aún de ser cuantificada. Esto es así tanto por las dificultades que se presentan en la práctica a la hora de deslindar lo ambiental de lo genético en lo referente al parecido entre el CI de distintos tipos de parientes, como por la posibilidad fundada de que, en este caso concreto, herencia y medio sean factores con efectos inseparables en lo que toca a su variación poblacional. Ambos obstáculos son ignorados por Jenkins, quien afirma que "no podemos evitar la conclusión de que la inteligencia humana está fuertemente determinada por el genotipo" (pág. 129, afirmaciones semejantes en la pág. 735), sin aportar más datos en su apoyo que los procedentes de gemelos monocigóticos cuya inutilidad en este tipo de estudios ha sido puesta claramente de manifiesto hace algo más de un decenio. Por último, aunque tales factores genéticos existieran no implicarían un determinismo, dilema del que Jenkins sólo sabe librarse haciendo gala de sus buenas intenciones y no de su conocimiento científico del problema ("Hay un peligro al elegir entre la hipótesis ambiental y la genética. Si la sociedad decide apoyar un argumento genético, se puede instituir una segregación, discriminación racial o algo peor", pág. 735). En definitiva, la *Genética* de J. B. Jenkins no pasa de ser otro libro de texto más del montón, sin mayor cosa que lo recomiende. (C. L.-F.)

NONLINEAR OSCILLATIONS, DYNAMICAL SYSTEMS, AND BIFURCATIONS OF VECTOR FIELDS, por John Guckenheimer y Philip Holmes. Springer Verlag; Berlín, 1984. El objeto del libro es la aplicación de los métodos de la teoría de sistemas dinámicos y teorías de bifurcación al estudio de las oscilaciones no lineales en un dominio local; es decir, para sistemas cuyos espacios de fases sean abiertos euclídeos.

Los autores justifican en el prólogo la elección de las aplicaciones a la teoría de oscilaciones no lineales por ser ésta una rama de interés que presenta importantes problemas abiertos, con la madurez suficiente para disponer de textos asequibles que exponen los métodos clásicos de análisis de los mismos. La mayoría de los ejemplos matemáticos abstractos conocidos en la teoría de sistemas dinámicos se presentan de *modo natural* en los problemas de oscilaciones no lineales.

El libro está dirigido principalmente a los profesionales de la ciencia aplicada y de la ingeniería en un sentido amplio, aunque es claro que puede ser también útil a los teóricos. Ello determina en cierto modo el estilo elegido y la naturaleza de los ejemplos analizados. El texto se ciñe sólo en parte al método tradicional en matemática: mientras que los enunciados de los teoremas aparecen destacados y numerados, las definiciones se dan frecuentemente en el transcurso de la exposición o vienen instadas por las propias consideraciones que originan la teoría. Sólo un número limitado de definiciones reciben un tratamiento formalizado, quedando éste reservado fundamentalmente a las nociones más técnicas y menos familiares de mayor importancia. (Las primeras definiciones formalizadas aparecen en la página 38 y siguientes a raíz del concepto de estabilidad estructural, y el último capítulo no contiene ninguna.)

Los autores enuncian con todo rigor y precisión los resultados fundamentales de las diversas teorías utilizadas en el libro (análisis, sistemas dinámicos, bifurcaciones, topología diferencial, etcétera), acompañándolas de las definiciones y comentarios necesarios para que todos sus términos sean inteligibles, pero evitan dar demostraciones de los mismos cuando éstas no ilustran directamente las aplicaciones a los problemas físicos tratados, remitiendo para ello al lector a referencias explícitas en cada caso. Otras veces se limitan a dar la idea central de la demostración. Los autores distinguen nítidamente entre los resultados utilizados y los demostrados, desarrollando la exposición entre estos dos niveles; por otro lado, las pruebas mantienen un buen grado de rigor y claridad. Además, se ilustran gráficamente las situaciones estudiadas (el libro contiene 206 ilustraciones), cuyo valor resulta de estricta justicia ponderar.

Los ejercicios intercalados en el texto han sido bien seleccionados. Reunen mucha información y ayudan a comprender la teoría. Son arquetípicos y no reiterativos; por tal motivo, su número es limitado. Su resolución requiere tiempo y a menudo presenta un buen grado de dificultad, especialmente en el último capítulo donde se advierte que algunos son materia de investigación. Su naturaleza es muy variada, abarcando desde el cálculo numérico hasta manipulaciones puramente teóricas. Por ejemplo, en el ejercicio 5.8.3 los autores proponen el uso de un microcomputador para un cálculo de exponentes de Liapunov y los argumentos expuestos en el segundo capítulo para la ecuación de Van der Pol son difíciles de seguir sin computación, mientras que los ejercicios 4.8.8 y 5.2.11 consisten en dar demostraciones de dos enunciados importantes.

En sentido estricto, la lectura del libro puede iniciarse con un conocimiento básico de análisis real (correspondiente, por ejemplo, al primer ciclo de nuestras facultades) con especial énfasis en ecuaciones diferenciales ordinarias y sistemas dinámicos, y un curso de mecánica. La limitación a dominios euclídeos reduce los preliminares necesarios de geometría diferencial, pero un primer curso de esta disciplina será indudablemente una buena ayuda para el lector.

Sentado lo precedente, es necesario advertir que el nivel del texto es alto, especialmente a partir del capítulo quinto, no por el grado de abstracción, que se mantiene voluntariamente asequible, sino por la cantidad de información vertida y el eclecticismo y variedad de las situaciones presentadas, que obligan a avanzar paso a paso manejando varios libros de consulta.

El libro consta de siete capítulos: I. Introducción: ecuaciones diferenciales y sistemas dinámicos; II. Una intro-

ducción al caos: cuatro ejemplos; III. Bifurcaciones locales; IV. Promedio y perturbación desde un punto de vista geométrico; V. Conjuntos hiperbólicos, dinámica simbólica y atractores extraños; VI. Bifurcaciones globales; VII. Bifurcaciones locales en codimensión dos de grupos uniparamétricos.

Se complementa con un apéndice, un glosario de términos y notaciones y la bibliografía. El apéndice contiene una selección de obras extraídas de la bibliografía dada al final que apunta a ciertas áreas relacionadas con los temas tratados. La bibliografía general ha sido confeccionada sin ánimo de exhaustividad. La definición de subvariedad dada en el glosario no está correctamente expresada y puede causar confusión entre los lectores no familiarizados con el lenguaje de la geometría diferencial.

El primer capítulo contiene una rápida exposición de algunos resultados básicos en la teoría de sistemas dinámicos. Se estudian los sistemas lineales (únicamente en el caso de coeficientes constantes) y se aborda el problema de la linealización; se enuncia el criterio de Hartman-Grobman y se cita el teorema de Sternberg para el caso diferenciable. Hay una sobreacumulación de conceptos en esta sección. El capítulo incluye el enunciado del teorema de Poincaré-Bendixson y el teorema de Peixoto sobre la caracterización de los campos vectoriales estructuralmente estables en las superficies compactas; termina con una somera discusión de las conjeturas de Smale sobre los sistemas de Morse-Smale.

El segundo capítulo introduce cuatro ejemplos de sistemas no lineales cuyas propiedades no han sido todavía exactamente entendidas. El más clásico de los cuatro y con amplias aplicaciones a la física es la ecuación de Van der Pol. Los otros tres modelos son mucho más recientes. El desarrollo de este capítulo ofrece una visión preliminar de la teoría desarrollada en el resto del libro.

Objeto del capítulo tres son los métodos de la teoría local de bifurcaciones para grupos uniparamétricos y morfismos, incluyendo las variedades centrales, las formas normales y el teorema de la bifurcación de Hopf. En el cuarto se describen métodos clásicos de análisis que se aplican a los problemas de oscilaciones no lineales y termina con una exposición nueva de la teoría de Kolmogorov-Arnold-Moser.

En el capítulo quinto se "regresa al caos"; esto es, al estudio de sistemas (bidimensionales) con conjuntos invariantes complicados. Reune varios temas entre los que cabe destacar un examen detallado de la herradura de Smale. (Uno de los artículos más citados a lo largo del texto es: S. Smale. "Differentiable dynamical systems". *Bull Amer. Math. Soc.* 73, 747-817 (1967). Este importante trabajo está reproducido en el libro de S. Smale: *The Mathematics of Time. Essays on Dynamical Systems, Economic Processes and Related Topics*, Springer-Verlag [1980], que incluye otros interesantes trabajos de Smale, entre los cuales el titulado "On how I got started in Dynamical Systems", donde el propio autor relata la génesis del descubrimiento de la famosa herradura.)

Pasa luego a ocuparse, en el capítulo siguiente, de la teoría global de bifurcaciones. Ilustra los resultados con los ejemplos del capítulo segundo. Especial mención merece la exposición de la sección 6.2 sobre los invariantes de un sistema discreto sobre la circunferencia. Se cierra el apartado con la aplicación de la técnica de renormalización a tres problemas de interés.

El último capítulo es el de mayor complejidad matemática en su presentación. Los autores usan ciertos resultados de la teoría de singularidades diferenciables, especialmente la teoría de deformaciones en el sentido de la teoría elemental de catástrofes, para obtener información sobre bifurcaciones de Hopf con una degeneración de orden superior y situaciones análogas. Incluyen una nota sobre k-chorros y gérmenes de determinación finita, la exposición es tan esquemática y ligada a los casos especiales tratados que no parece suficiente para que el lector no especializado lo entienda.

La presentación del libro está cuidada, como acredita la colección a la que pertenece; pero contiene alguna errata. La cita en el enunciado del corolario 4.8.5 no es correcta. No puede considerarse la obra un libro de sistemas dinámicos en sentido tradicional, ni siquiera de sistemas dinámicos "con aplicaciones". En este sentido es no sólo nuevo, sino también novedoso. El tratamiento utilizado no es de los que dejarían completamente satisfecho a un matemático y, por otra parte, es posible que su contenido no sea tan asequible a sus destinatarios como fuera de desear.

De todos modos, el texto es un serio intento de agrupar y estructurar un conjunto de resultados de interés actual dispersos en la literatura especializada cuya lectura directa no suele estar al alcance. (J. M.)

Los autores

DOMINGO CAMPILLO ("Paleopatología de la columna vertebral"), que se formó en la Facultad de Medicina de la Universidad de Barcelona, dirige, desde 1970, el Laboratorio de Paleoantropología y Paleopatología del Museo Arqueológico de Barcelona, cargo que comparte con la enseñanza de esa disciplina. Su labor se ha desarrollado en tres campos: la neurocirugía, la paleoantropología y la paleopatología, debiendo ser considerado en esta última especialidad como un pionero en nuestro país. Ha escrito numerosos artículos, técnicos y de divulgación, ha dictado múltiples conferencias, cursos y cursillos. Tiene publicados tres libros sobre paleopatología.

G. NIGEL GODSON ("Biología molecular de las vacunas de la malaria") es profesor y jefe del departamento de bioquímica de la Facultad de Medicina de la Universidad de Nueva York. En la Universidad de Londres, donde estudió, se recibió de doctor en 1962. Trabajó en el centro adscrito al Chester Beatty, del Instituto de Investigaciones Oncológicas de Londres, y más tarde en el Instituto de Tecnología de California y en la Facultad de Medicina de la Universidad de Yale. En 1969 se incorporó al claustro docente de Yale, dictando cursos en el departamento de radiología hasta 1980, cuando accedió a su cargo actual.

HANS A. BETHE y GERALD BROWN ("Así explota una supernova"), colaboradores durante muchos años en el estudio de las supernovas, son, respectivamente, profesor honorario de física de la Universidad de Cornell y profesor de física de la estatal de Nueva York en Stony Brook. Bethe nació y se educó en Alemania. En 1935, después de trabajar en varios centros universitarios de su país y Gran Bretaña, ingresó en el claustro docente de Cornell. En 1967, Bethe obtuvo el premio Nobel por sus descripciones de las reacciones nucleares mediante las cuales las estrellas generan energía. Brown se doctoró en Yale en 1950. Marchó después al extranjero, explicando física en la Universidad de Birmingham, primero, y en 1960 en el Instituto Nórdico de Física Atómica Teórica de Copenhague. Tras su regreso a los Estados Unidos, estuvo en la Universidad de Princeton, antes de pasar a Stony Brook. Bethe y Brown quieren agradecer a Stanford Woosley, de la Universidad de California en Santa Cruz, la ayuda prestada a la hora de redactar este artículo.

FRANK V. KOSIKOWSKI ("El queso"), profesor de alimentación de la Universidad de Cornell, ha pasado 45 años enseñando e investigando. En 1939 completó el primer ciclo universitario en Connecticut, de donde se trasladó a Cornell, por la que se licenció en 1941. Obtuvo el doctorado en 1944. Sus investigaciones y enseñanzas han versado sobre fermentaciones alimentarias, como la de la leche, fundamental para la fabricación de queso. También ha intervenido en diversas actividades internacionales relacionadas con la política alimentaria. En 1960 fue consejero del gobierno de Puerto Rico en asuntos alimentarios y, en 1963, trabajó en Roma en la sede central de la Organización para la Alimentación y la Agricultura (FAO). Voluntario de la Corporación Internacional del Servicio Ejecutivo, pasó gran parte de 1970 en Irán, en calidad de consejero técnico; también ha estudiado la elaboración de queso entre los nómadas de Azerbaiján.

JAMES N. CAMERON ("La muda del cangrejo azul") es profesor de estudios marinos y zoología de la Universidad de Texas en Austin. Licenciado por la de Wisconsin en Madison (1966), se doctoró por la de Texas en Austin (1969). Durante dos años disfrutó de una beca postdoctoral de los Institutos Nacionales de la Salud en la Universidad de Columbia Británica en Vancouver. En 1971 mantuvo su rumbo Norte, incorporándose al Instituto de Biología Artica de la Universidad de Alaska en Fairbanks; en 1975 aceptó un cargo en Texas. Se interesa en especial por los animales de respiración parcialmente aérea, y por lo que revelan acerca de cómo evolucionaron las formas de respiración aérea a partir de antepasados acuáticos. Ese interés ha llevado a Cameron a las islas pacíficas de Eniwetok y Palau, para estudiar los cangrejos terrestres, y al Amazonas, para investigar los peces pulmonados.

ROBERT M. HAZEN y LARRY W. FINGER ("Cristales a altas presiones") han trabajado juntos durante años en cristalografía a altas presiones. Ambos pertenecen al laboratorio geofísico de la Institución Carnegie de Washington, donde Hazen se ocupa de la mineralogía y Finger de la cristalografía. Hazen se licenció en geología por el Instituto de Tecnología de Massachussets, doctorándose en mineralogía por la Universidad de Harvard, en 1975. En 1976, después de un breve período de becario postdoctoral de la OTAN, en el departamento de mineralogía y petrología de la Universidad de Cambridge, ingresó en la Institución Carnegie. Hazen es trompetista sinfónico profesional y, junto con su mujer, Margaret, ha escrito varios libros sobre la historia de la geología. Finger estudió en la Universidad de Minnesota, por la que se doctoró en 1967. Desde entonces ha trabajado en la Institución Carnegie, salvo el curso de 1975-76, en que estuvo de profesor visitante en la Universidad estatal de Nueva York en Stony Brook. De 1975 a 1979 fue secretario de la Sociedad Mineralógica Americana.

HANS WALLACH ("Percepción de un entorno estable") es profesor de psicología del Swarthmore College. Se doctoró por el Instituto de Psicología de la Universidad de Berlín en 1934, realizando su tesis bajo la dirección de Wolfang Köhler, fundador de la escuela psicológica de la Gestalt. En 1936, siguiendo los pasos de Köhler, Wallach se trasladó al Swarthmore, en el que entró de ayudante de investigación, concediéndosele poco después la dedicación plena. De 1947 a 1957 trabajó en la New School for Social Research y, durante el curso 1954-55, fue profesor visitante en el Instituto de Estudios Avanzados de Princeton. Dejó la enseñanza en 1975, para dedicarse por completo a la investigación.

GOTTFRIED FRENZEL ("Restauración de vidrieras medievales"), historiador del arte y restaurador, dirige el Instituto de Investigación y Restauración de Vidrieras de Nürnberg. Estudió pintura y artes gráficas en Dresde, dedicándose posteriormente a la arqueología, a la psicología y a la enseñanza del arte en Darmstadt. Compaginó el trabajo en un taller de vidrio, diseñando vidrieras, con la preparación de su tesis doctoral en la Universidad de Nürnberg, que defendió en 1955 y que versaba sobre las vidrieras de fines de la Edad Media en esa ciudad. Desde entonces, Frenzel se ha ocupado de la restauración de vidrieras medievales, de investigar las técnicas del vidrio y de luchar en favor de la conservación de los monumentos históricos alemanes y europeos.

Bibliografía

Los lectores interesados en una mayor profundización de los temas expuestos pueden consultar los trabajos siguientes:

PALEOPATOLOGIA DE LA COLUMNA VERTEBRAL

PALÉOPATHOLOGIE ET PATHOLOGIE COMPARATIVE. L. Pales. Masson; Paris, 1930.

DISEASES IN ANTIQUITY. Don Brothwell y A. T. Sandison. Charles C. Thomas; Illinois, 1967.

PALEOPATHOLOGICAL DIAGNOSIS AND INTERPRETATION. R. Steinbock. Charles C. Thomas, Illinois, 1976.

PREHISTORIC TUBERCULOSIS IN THE AMERICAN. Dirigido por J. Buikstra. Northwestern University Press (Archeological Program), 1981.

LA ENFERMEDAD EN LA PREHISTORIA. Domingo Campillo. Ed. Salvat; Barcelona, 1983.

PATHOLOGIE OSSEUSE AU MOYEN AGE EN PROVENCE. B.-Y. Mafart. Ed. CNRS; París, 1983.

BIOLOGIA MOLECULAR DE LAS VACUNAS DE LA MALARIA

IDENTIFICATION AND CHEMICAL SYNTHESIS OF A TANDEMLY REPEATED IMMUNOGENIC REGION OF *PLASMODIUM KNOWLESI* CIRCUMSPOROZOITE PROTEIN. G. N. Godson, J. Ellis, P. Svec, D. H. Schlesinger y V. Nussenzweig en *Nature*, vol. 305, n.° 5929, págs. 29-33; 1 de septiembre de 1983.

ISOLATE-SPECIFIC S-ANTIGEN OF *PLASMODIUM FALCIPARUM* CONTAINS A REPEATED SEQUENCE OF ELEVEN AMINO ACIDS. Ross L. Coppel, Alan F. Cowman, Klaus R. Lingelbach, Graham V. Brown, Robert B. Saint, David J. Kemp y Robin F. Anders en *Nature*, vol. 306, n.° 5945, págs. 751-756; 22 de diciembre de 1983.

STRUCTURE OF THE GENE ENCODING THE IMMUNODOMINANT SURFACE ANTIGEN ON THE SPOROZOITE OF THE HUMAN MALARIA PARASITE *PLASMODIUM FALCIPARUM*. John B. Dame, Jackie L. Williams, Thomas F. McCutchan, James L. Weber, Robert A. Wirtz, Wayne T. Hockmeyer, W. Lee Maloy, J. David Haynes, Imogene Schneider, Donald Roberts, Greg S. Sanders, E. Premkumar Reddy, Carter L. Diggs y Louis H. Miller en *Science*, vol. 225, n.° 4662, págs. 593-599; 10 de agosto de 1984.

ASI EXPLOTA UNA SUPERNOVA

SUPERNOVAE: A SURVEY OF CURRENT RESEARCH. M. J. Rees y R. J. Stoneham. D. Reidel Publishing Co., 1982.

SUPERNOVA THEORY. G. E. Brown, H. A. Bethe y Gordon Baym en *Nuclear Physics*, vol. A375, n.° 3, págs. 481-532; 15 de febrero de 1982.

SUPERNOVAE, PART I: THE EVENTS. Virginia Trimble en *Reviews of Modern Physics*, vol. 54, n.° 4, págs. 1183-1224; octubre, 1982.

SUPERNOVAE, PART II: THE AFTERMATH. Virginia Trimble en *Reviews of Modern Physics*, vol. 55, n.° 2, págs. 511-563; abril, 1983.

EL QUESO

FUNDAMENTALS OF DAIRY CHEMISTRY. Byron H. Webb, Arnold H. Johnson y John A. Alford. Avi Publishing Co., 1974

CHEESE AND FERMENTED MILK FOODS. Frank Kosikowski. F. V. Kosikowski and Associates, P.O. Box 139, Brooktondale, N.Y. 14817; 1977.

CHEESE VARIETIES AND DESCRIPTIONS. Publicación n.° 54, Servicio de Investigación Agrícola, Depto. Agricultura de los Estados Unidos; 1978.

LA MUDA DEL CANGREJO AZUL

PEPTIDES IN THE SINUS GLAND OF *CARDISOMA CARNIFEX*: ISOLATION AND AMINO ACID ANALYSIS. Robert W. Newcomb en *Journal of Comparative Physiology*, vol. 153, págs. 207-221; 1983.

APPARENT H^+ EXCRETION AND CO_2 DYNAMICS ACCOMPANYING CARAPACE MINERALIZATION IN THE BLUE CRAB (*CALLINECTES SAPIDUS*) FOLLOWING MOULTING. James N. Cameron y Chris M. Wood en *Journal of Experimental Biology*, vol. 114. En prensa.

CRISTALES A ALTAS PRESIONES

THE NATURE OF THE CHEMICAL BOND AND THE STRUCTURE OF MOLECULES AND CRYSTALS: AN INTRODUCTION TO MODERN STRUCTURAL CHEMISTRY. Linus Pauling. Cornell University Press, 1960.

COMPARATIVE CRYSTAL CHEMISTRY. Robert Hazen y Larry Finger. John Wiley & Sons, Inc., 1982.

GEOMETRICAL AND STRUCTURAL CRYSTALLOGRAPHY. Joseph V. Smith. John Wiley & Sons, Inc., 1982.

PERCEPCION DE UN ENTORNO ESTABLE

ON PERCEPTION. Hans Wallach. Quadrangle/The New York Times Book Co., 1976.

TWO KINDS OF ADAPTATION IN THE CONSTANCY OF VISUAL DIRECTION AND THEIR DIFFERENT EFFECTS ON THE PERCEPTION OF SHAPE AND VISUAL DIRECTION. Hans Wallach y Joshua Bacon en *Perception & Psychophysics*, vol. 21, n.° 3, págs. 227-242; 1977.

A LIMITATION OF POSITION CONSTANCY. Robert Becklen, Hans Wallach y Donna Nitzberg en *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, vol. 10, n.° 5, págs. 713-723; octubre, 1984.

RESTAURACION DE VIDRIERAS MEDIEVALES

THE DETERIORATION AND CONSERVATION OF STAINED GLASS: A CRITICAL BIBLIOGRAPHY AND THREE RESEARCH PAPERS. R. G. Newton. *Corpus Vitrearum Medii Aevi Great Britain—Occasional Papers 1*. Editado para la Academia Británica por Oxford University Press, 1974.

THE EARLY STAINED GLASS OF CANTERBURY CATHEDRAL. Madeline Harrison Caviness. Princeton University Press, 1977.

JUEGOS DE ORDENADOR

WINNING WAYS FOR YOUR MATHEMATICAL PLAYS. Elwyn R. Berlekamp, John H. Conway y Richard K. Guy. Academic Press, 1982.

THE PLANIVERSE. A. K. Dewdney. Poseidon Press, 1984.

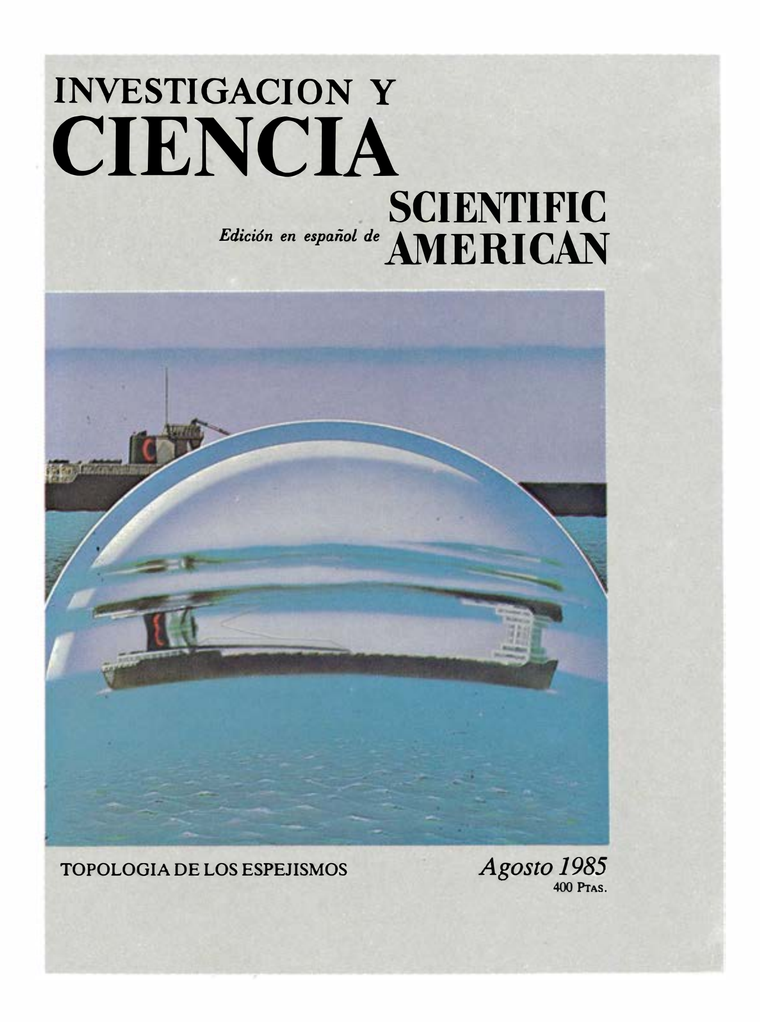
PROGRAMACIÓN EN CIENCIAS Y MATEMÁTICAS. Stephen Wolfram en *Investigación y Ciencia*, n.° 98, págs. 124-138; noviembre, 1984.

TALLER Y LABORATORIO

FUN WITH STRING FIGURES. W. W. Rouse Ball. Dover Publications, Inc., 1971.

ORDERLY TANGLES: CLOVERLEAFS, GORDIAN KNOTS, AND REGULAR POLYLINKS. Alan Holden. Columbia University Press, 1983.

Seguiremos explorando los campos del conocimiento



ECOLOGIA SOCIAL DE LOS CHIMPANCES, por Michael P. Ghiglieri
Raramente se ha estudiado los chimpancés en libertad sin el cebo de la comida. La observación de esos simios sin abastecerlos muestra que su estructura social sólo la comparten con los humanos.

LOS SIFONES DE LOS ACUEDUCTOS ROMANOS, por A. Trevor Hodge
Aprovechaban el principio de que el agua de las tuberías siempre retorna a su nivel original.

TOPOLOGIA DE LOS ESPEJISMOS, por Walter Tape
Una operación matemática permite interpretar ciertas características de los espejismos sin un conocimiento detallado de las condiciones atmosféricas.

ELECCION DE TECNOLOGIA, por Wassily Leontief
La introducción en la economía de nuevas técnicas produce efectos que escapan a toda posible predicción tras el examen aislado de cada industria.

LA FUNCION INMUNOLOGICA DE LA PIEL, por Richard L. Edelson y Joseph M. Fink
El mayor órgano de nuestro cuerpo no se limita a constituir un manto protector: constituye un elemento activo del sistema inmunitario.

ACTH Y SU FAMILIA DE PEPTIDOS, por Fernando Estívariz
La hormona adrenocorticotrófica, ACTH, *se sintetiza bajo la forma de una molécula precursora de naturaleza proteica en la hipófisis. En esta glándula se originan otros péptidos con distintas actividades biológicas.*

CUMULOS GLOBULARES, por Ivan R. King
Densos apiñamientos de estrellas viejas cuya propia gravitación los mantiene unidos.

LOS PRIMEROS ORGANISMOS, por A. G. Cairns-Smith
La constitución y materiales de los primeros organismos capaces de evolucionar por selección natural no serían los de hoy. Podría tratarse de cristales de arcilla

